

# POLITECNICO DI TORINO



Laurea Magistrale in INGEGNERIA ELETTRICA

## Costi e benefici del collegare gli schermi dei cavi MT all'impianto di terra della sottostazione AT/MT

Relatori

Pietro COLELLA

Enrico PONS

Giovanni PECA

Candidato

Vincenzo MONACIS

Luglio 2025

# Sommario

Questa tesi affronta il tema dell'interconnessione degli schermi dei cavi di media tensione (MT) con l'impianto di terra delle sottostazioni AT/MT. Il lavoro nasce dall'esigenza di comprendere a fondo il ruolo degli schermi metallici dei cavi MT, un elemento fondamentale per garantire sicurezza, affidabilità e continuità di servizio nella rete di distribuzione elettrica.

Il primo capitolo introduce la struttura delle reti di distribuzione, descrivendo le principali componenti del sistema MT e le peculiarità costruttive dei cavi unipolari. Viene posta particolare attenzione ai giunti, elemento critico sia per la continuità del servizio che per la sicurezza, illustrandone le tipologie, le principali cause di guasto e l'influenza che l'installazione e le condizioni ambientali esercitano sulla loro vita utile.

Nel secondo capitolo si analizza il collegamento degli schermi dei cavi MT alla rete di terra delle sottostazioni. Viene discusso l'impatto delle correnti di guasto che possono attraversare gli schermi metallici, specialmente nei sistemi a neutro compensato, dove le correnti possono permanere per alcuni secondi. Si esaminano inoltre i fenomeni di potenziale trasferito causati da fulminazioni o guasti sul sistema AT, con riferimento a studi sperimentali e simulativi che mettono in luce il comportamento della rete in differenti configurazioni di interconnessione. Un approfondimento è riservato anche alle tensioni indotte sugli schermi per effetto di armoniche e modalità di posa non ottimali, evidenziando i rischi per la sicurezza e il possibile surriscaldamento degli schermi metallici.

Il terzo capitolo presenta una campagna sperimentale condotta in collaborazione con IRETI presso la sottostazione Arbarello di Torino. Vengono illustrati i risultati di misura delle correnti circolanti negli schermi, delle resistenze longitudinali e delle tensioni tra schermi e impianto di terra, sia in condizioni di esercizio ordinario che in fuori servizio. I dati raccolti forniscono una base empirica per valutare le reali condizioni di funzionamento dei cavi MT e l'effetto dei collegamenti di terra.

Nel quarto capitolo si esplora la correlazione tra la presenza dei giunti e l'incidenza dei guasti nella rete. Attraverso l'analisi statistica dei dati di guasto forniti da IRETI, viene messa in evidenza la relazione tra la lunghezza dei cavi, il numero di giunti e la frequenza dei malfunzionamenti. Si fa uso di strumenti grafici avanzati,

come scatter plot, bubble plot e heatmap, per visualizzare criticità e tendenze nelle diverse aree della rete torinese.

Infine, le conclusioni propongono una sintesi critica dei risultati ottenuti, evidenziando come una corretta progettazione dei collegamenti di terra e un'accurata gestione degli schermi metallici possano migliorare l'affidabilità della rete, ridurre i guasti e ottimizzare la manutenzione.

# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	v
<b>Elenco delle figure</b>	vii
<b>1 Le reti di distribuzione</b>	1
1.1 La sottostazione AT/MT . . . . .	3
1.1.1 Struttura . . . . .	3
1.1.2 Automatismi e telecontrollo . . . . .	4
1.2 Il cavo di media tensione . . . . .	5
1.3 I giunti dei cavi MT . . . . .	7
1.3.1 Struttura . . . . .	8
1.3.2 Principali cause di guasto . . . . .	9
1.4 La rete di terra del sistema MT . . . . .	13
1.4.1 Impianto di terra della sottostazione AT/MT . . . . .	13
1.4.2 Rete di terra del sistema MT . . . . .	14
<b>2 Collegamento degli schermi dei cavi MT all'impianto di terra della sottostazione AT/MT</b>	16
2.1 Correnti negli schermi dei cavi MT . . . . .	16
2.2 Potenziali trasferiti e correnti sul sistema di MT dovute ad un evento di fulminazione sul sistema AT . . . . .	19
2.3 Tensione indotta negli schermi da armoniche e carenze nelle procedure di installazione . . . . .	25
2.3.1 Modalità di posa dei cavi . . . . .	26
2.3.2 Armoniche . . . . .	34
2.4 Perdite della linea MT e temperatura degli schermi . . . . .	38
<b>3 Caratterizzazione sperimentale della corrente circolante negli schermi dei cavi MT</b>	49
3.1 Prima attività di misure sperimentali - sottostazione Arbarello . . .	49
3.1.1 Misura della corrente negli schermi . . . . .	50

3.1.2	Misura della resistenza degli schermi . . . . .	52
3.1.3	Misura della tensione tra gli schermi dei cavi MT e l'impianto di terra di sottostazione - configurazione 1 . . . . .	53
3.1.4	Tensione tra gli schermi dei cavi MT e l'impianto di terra di sottostazione - configurazione 2 . . . . .	58
3.2	Seconda attività di misure sperimentali . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Effetto di lunghezza e giunti sui guasti</b>	<b>65</b>
4.1	Definizione del dataset . . . . .	65
4.2	Analisi dei dati . . . . .	69
4.2.1	Scatter plot . . . . .	69
4.2.2	Bubble plot . . . . .	73
4.2.3	Heatmap . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>93</b>

# Elenco delle tabelle

1.1	Fattori di invecchiamento . . . . .	11
2.1	Fattore di riduzione della corrente di fulmine in funzione della resistività del terreno e della lunghezza L degli schermi . . . . .	22
2.2	Valore di $i^2t$ nello schermo metallico dei cavi . . . . .	22
2.3	Sezioni minime del conduttore di terra CEI 64-8 e IEC 60364. . . . .	23
2.4	Valore della tensione indotta [V] nella schermatura metallica di un cavo XLPE in funzione della tensione di esercizio, sezione, tensione isolamento del cavo e lunghezza. In presenza di armoniche. Schermi collegati a terra solo ai terminali di partenza - <i>O.Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»</i> [15] . . . . .	34
2.5	Tensione indotta [V] nello schermo metallico di un cavo in XLPE da 50 mm <sup>2</sup> da 35 kV, in funzione del numero di trasposizioni degli schermi e della presenza di armoniche - <i>O.Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»</i> [15] . . . . .	35
2.6	Tensione indotta [V] nello schermo di un cavo XLPE da 50 mm <sup>2</sup> , in presenza di armoniche e variazione del fattore di carico - <i>O.Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»</i> [15] . . . . .	37
2.7	Perdite nei cavi adiacenti non schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	40
2.8	Perdite nei cavi adiacenti schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	40
2.9	Perdite nei cavi non schermati distanziati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	42

2.10	Perdite nei cavi schermati distanziati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	42
2.11	Temperature massime dei cavi adiacenti in diverse configurazioni - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	46
2.12	Temperature massime dei cavi distanziati in diverse configurazioni - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19] . . . . .	47
3.1	Caratteristiche schermi cavi MT . . . . .	50
3.2	Valori efficaci medi [A] delle correnti per ogni armonica . . . . .	63
4.1	File Excel - Prime tratte rev01 . . . . .	66
4.2	Foglio Excel riassuntivo dei principali dati relativi alle tratte: prima, totale e intermedia delle linee in media tensione di Torino . . . . .	68

# Elenco delle figure

1.1	Struttura radiale rete MT . . . . .	2
1.2	Struttura ad anello aperto rete MT . . . . .	2
1.3	Schema unifilare cabina primaria . . . . .	4
1.4	Cavo unipolare di media tensione - <i>Com Cavi S.p.A. Cavi elettrici di media tensione</i> . <sup>[4]</sup> . . . . .	5
1.5	Giunto termorestringente - <i>Raytech S.r.l. Giunti termorestringenti unipolari</i> . <sup>[7]</sup> . . . . .	8
1.6	Giunto autorestringente - <i>Raytech S.r.l. Giunti termorestringenti unipolari</i> . <sup>[7]</sup> . . . . .	9
1.7	Numero di guasti ai giunti interrati delle linee di media tensione di e-distribuzione, suddivisi per mese dell'anno, nel periodo 2012-2017. - <i>L.Calcara et al., «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints»</i> <sup>[9]</sup> . . . . .	10
1.8	Ispezione del giunto di un cavo interrato dopo il cedimento. - <i>L.Calcara et al., «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints»</i> <sup>[9]</sup> . . . . .	11
1.9	Maglia di terra della sottostazione AT/MT - <i>A. Russo e P. Colella. Slide delle lezioni del corso "Fondamenti di Impianti Elettrici", Politecnico di Torino</i> <sup>[3]</sup> . . . . .	14
1.10	Rete in media tensione - Impianto di terra globale - <i>A. Russo e P. Colella. Slide delle lezioni del corso "Fondamenti di Impianti Elettrici", Politecnico di Torino</i> <sup>[3]</sup> . . . . .	15
2.1	Collegamento danneggiato tra lo schermo del cavo e lo schermo del giunto. - <i>A.Sturchio et al., «Thermal behavior of distribution MV underground cables»</i> <sup>[12]</sup> . . . . .	17
2.2	Schema di un singolo guasto fase-terra in una rete a neutro compensato	18
2.3	Schema di un doppio guasto fase-terra in una rete a neutro compensato	18

2.4	Numero di interruzioni dovute a guasti di giunti e cavi MT (in % sul totale nel periodo 2013-2017) nella rete di e-distribuzione, suddivise per tipo di guasto: guasto fase-terra (1LG), doppio guasto fase-terra (2LG) e guasto da cortocircuito (SC). - <i>L.Calcara et al., «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints»</i> [9] . . . . .	19
2.5	Possibili situazioni di rischio elettrico a seguito di potenziali pericolosi	20
2.6	Collegamenti tra impianti di terra . . . . .	21
2.7	Profili temporali di corrente nella sezione equivalente totale degli schermi dei cavi - <i>G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»</i> [14] . . . . .	23
2.8	Profilo corrente nella corda di rame in terreno a bassa resistività 100 $\Omega\cdot\text{m}$ e distanza tra cabine pari a 500 m - <i>G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»</i> [14] . . . . .	24
2.9	Profilo corrente nella corda di rame in terreno ad alta resistività 5000 $\Omega\cdot\text{m}$ e distanza tra cabine pari a 500 m - <i>G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»</i> [14] . . . . .	25
2.10	Schermi dei cavi connessi da entrambi i lati (sopra) e da solo un lato (sotto) . . . . .	27
2.11	Configurazione a trifoglio (sopra) e configurazione piana (sotto) . . . . .	28
2.12	Tensioni indotte negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da solo un lato - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17] . . . . .	29
2.13	Correnti di circolazione negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da entrambi i lati - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17] . . . . .	30
2.14	Potenza dissipata negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da entrambi i lati - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17] . . . . .	31
2.15	(a)tensione degli schermi al variare della lunghezza (b)perdite di circolazione al variare della lunghezza - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17] . . . . .	31

2.16	(a)tensione degli schermi al variare della spaziatura tra cavi (b)correnti di circolazione al variare della spaziatura tra cavi - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17]	32
2.17	(a)tensione degli schermi al variare della frequenza di rete (b)correnti di circolazione al variare della frequenza di rete - <i>M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»</i> [17]	32
2.18	Trasposizione degli schermi dei cavi	35
2.19	Circuito equivalente trasposizione degli schermi dei cavi	36
2.20	Configurazione piatta cavi adiacenti schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	39
2.21	Configurazione trifoglio cavi adiacenti non schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	39
2.22	Analisi FEM densità di corrente schermi, configurazione piatta, cavi distanziati schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	41
2.23	Analisi FEM densità di corrente schermi, configurazione trifoglio, cavi adiacenti schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	41
2.24	Mesh degli elementi finiti per l'analisi termica - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	44
2.25	Analisi termica FEM configurazione trifoglio cavi adiacenti schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	46
2.26	Analisi termica FEM configurazione piatta cavi distanziati schermati - <i>M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»</i> [19]	47
3.1	Quadri MT stazione Arbarello	50
3.2	Schema prima prova	51
3.3	Vista posteriore dello scomparto linea Denina	51
3.4	Schema seconda prova	52
3.5	Schema terza prova	53

3.6	Acquisizione delle tensioni sugli schermi . . . . .	53
3.7	Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea da entrambi i lati e neutro compensato . . . . .	54
3.8	FFT della 5 <sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi . . . . .	55
3.9	Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea da entrambi i lati e neutro isolato . . . . .	56
3.10	FFT della 13 <sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi . . . . .	57
3.11	Schema quarta prova . . . . .	58
3.12	Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea solo da un lato e neutro isolato . . . . .	59
3.13	FFT della 18 <sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi . . . . .	60
3.14	Profili temporali delle correnti negli schermi dei cavi con linea in servizio e neutro compensato . . . . .	61
3.15	FFT della 1 <sup>a</sup> acquisizione di corrente degli schermi dei cavi . . . . .	62
3.16	Profili temporali dei valori efficaci delle correnti negli schermi dei cavi con linea in servizio e neutro compensato . . . . .	64
4.1	Scatter plot 1 - Guasti in funzione della lunghezza della linea . . . . .	70
4.2	Scatter plot 2 - Guasti in funzione del numero di giunti . . . . .	71
4.3	Scatter plot 3 - Guasti in funzione del rapporto giunti/lunghezza . . . . .	72
4.4	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Arbarello . . . . .	74
4.5	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Centro . . . . .	75
4.6	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Levanna . . . . .	76
4.7	Bubbleplot relativo alla Cabina Primaria Lucento . . . . .	77
4.8	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Martinetto . . . . .	78
4.9	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Monterosa . . . . .	79
4.10	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Ovest . . . . .	80
4.11	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Stura . . . . .	81
4.12	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Sud . . . . .	82
4.13	Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Sud Ovest . . . . .	83
4.14	Bubble plot complessivo di tutte le Cabine Primarie . . . . .	84
4.15	Bubble plot complessivo di tutte le Cabine Primarie . . . . .	85
4.16	Heatmap complessiva di tutte le Cabine Primarie . . . . .	88

# Capitolo 1

## Le reti di distribuzione

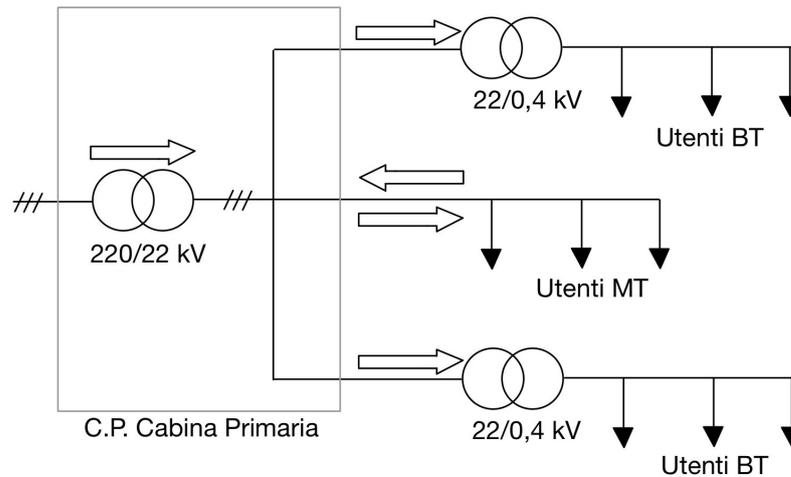
L'insieme delle infrastrutture che consentono il trasporto dell'energia elettrica dalle cabine primarie agli utilizzatori finali è definito come rete di distribuzione. Si possono identificare al suo interno due sottoreti a cui corrispondono diversi livelli di tensione nominale di esercizio.

Per la porzione di rete in MT i valori sono compresi tra i 5÷30 kV, mentre per la parte di rete in BT la tensione nominale di esercizio tipica è di 400 V, da cui deriva la tensione monofase a 230 V.[1]

A seconda della potenza richiesta dalla rete, è possibile identificare tre categorie di utenze: piccole, medie e grandi. Potenze tipiche del settore domestico, artigianale e di illuminazione pubblica o comunque fino ai 100 kVA vengono alimentate in bassa tensione. Le medie e grandi utenze, come ad esempio il settore industriale e dei servizi, vengono alimentate in media tensione, purché la potenza assorbita risulti inferiore ai 10 MVA.[1]

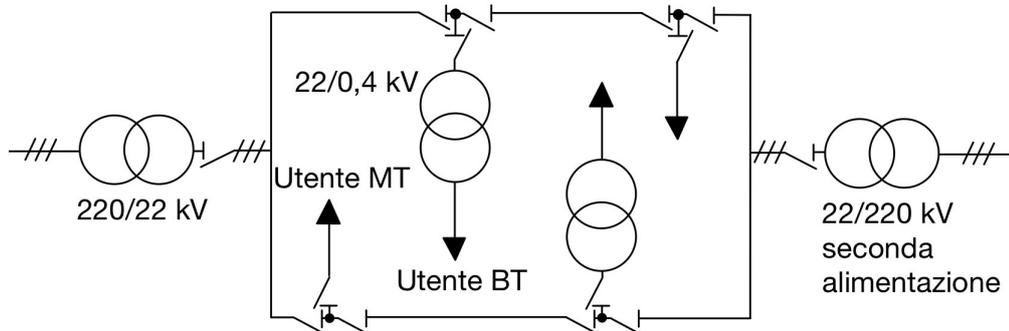
L'assetto delle reti utilizzato in Italia prevede per la distribuzione pubblica in media tensione una struttura debolmente magliata ad esercizio radiale. Questa configurazione consente di semplificare gli schemi di protezione e di avere a disposizione dei collegamenti elettrici mantenuti aperti per essere in grado di alimentare porzioni di rete in caso di guasto sulla dorsale di alimentazione principale. La scelta di queste connessioni aperte si basa su criteri che tengono conto della minimizzazione delle perdite, della riduzione dei costi operativi e dell'ottimizzazione dell'affidabilità di rete[1].

In figura 1.1 è presente la tipica struttura di una rete radiale in MT alimentata da una cabina primaria. Risulta chiara sia la semplicità di identificare e localizzare i guasti, sia i vantaggi economici e costruttivi di questa configurazione. Inoltre, viene ridotta l'intensità delle correnti di corto circuito rispetto alla configurazione magliata. Per migliorare la continuità di servizio, spesso viene adottata la controalimentazione dei carichi attraverso una cabina sul lato opposto.



**Figura 1.1:** Struttura radiale rete MT

Un'altra tipica struttura di rete (figura 1.2) prevede la gestione ad anello aperto dell'alimentazione. Questa soluzione è adottata per alimentare grandi utenze che richiedono un ottimo livello di continuità di esercizio. Infatti, spesso è presente una seconda alimentazione da utilizzare in condizioni di emergenza o manutenzione sulla cabina primaria principale.



**Figura 1.2:** Struttura ad anello aperto rete MT

Negli ultimi anni, si è assistito ad un aumento della generazione locale di energia all'interno della rete stessa, grazie allo sviluppo delle tecnologie eoliche e fotovoltaiche. Questo ha portato ad una gestione della stabilità di rete più complicata, a causa della non programmabilità di queste fonti rinnovabili. Gli operatori dei sistemi di distribuzione, per fronteggiare questa situazione, hanno introdotto nella rete un livello di automazione maggiore dei componenti. È quindi possibile effettuare delle riconfigurazioni dell'assetto di rete da remoto.[1]

## 1.1 La sottostazione AT/MT

La sottostazione Alta Tensione/Media Tensione è l'elemento principale nella rete di distribuzione elettrica, in quanto svolge il compito di trasformare la tensione elettrica proveniente dalla rete di subtrasmissione ad alta tensione, solitamente a 132 kV o 150 kV, in una tensione compatibile con la distribuzione locale che varia tra 5÷30 kV, a seconda della zona geografica. Ciò è necessario per garantire un'erogazione sicura ed efficiente dell'energia elettrica agli utenti finali.[2]

### 1.1.1 Struttura

Una cabina primaria è composta da diverse sezioni[2]:

- Parte di alta tensione: include linee in ingresso, trasformatori di tensione (TV) capacitivi la cui funzione è quella di diminuire la tensione al valore nominale di 100 V per poterla misurare in sicurezza, sezionatori con funzione di separazione visiva necessaria all'esecuzione di lavori fuori tensione, trasformatori di corrente (TA) con il compito di diminuire la corrente di linea al valore nominale di 5 A per poterla misurare senza rischi e per utilizzarla nei circuiti di protezione e di rilevazione del carico nella linea, e infine gli interruttori in grado di interrompere le correnti ordinarie e di guasto. Tutti questi componenti lavorano insieme per gestire e proteggere l'energia in ingresso ad alta tensione.
- Trasformatori: riducono la tensione da livelli AT a MT, rendendo l'energia adatta per la distribuzione locale. Lo schema tipico prevede l'installazione di due trasformatori di potenza compresa tra 16÷63 MVA dotati di una certa capacità di sovraccarico temporaneo che può arrivare al 150% se di lunga durata o al 180% se di breve durata. Sono in coppia per aumentare l'affidabilità della rete nel caso di guasto di uno dei due. Ogni trasformatore ha poi un regolatore di tensione (denominato VSC, Variatore Sotto Carico) che permette di elevare o abbassare la tensione di uscita (+/- 10%); normalmente il VSC è comandato da un dispositivo automatico (RAT, Regolatore Automatico di Tensione) che permette di mantenere la media tensione costante al variare del carico assorbito dalla rete e della tensione lato AT.
- Parte di media tensione: comprende sbarre, interruttori e linee in uscita. Inoltre, possono essere presenti anche dei gruppi di rifasamento, che sono formati da schiere di condensatori e vengono utilizzati per ridurre la componente induttiva della corrente di linea. Ciascun trasformatore è collegato alla relativa semisbarra; in caso di guasto le due semisbarre possono essere collegate tra loro attraverso il congiuntore di sbarra per garantire la continuità dell'alimentazione delle linee a valle seppur con il conseguente sovraccarico

temporaneo del trasformatore in servizio. L'energia in uscita dalla cabina primaria viene poi trasportata alle cabine secondarie.

- Servizi ausiliari: alimentati da un trasformatore MT/BT, forniscono energia per tutti quei componenti che funzionano in bassa tensione all'interno della cabina primaria, inclusi sistemi di illuminazione, protezioni e sistemi di telecontrollo.

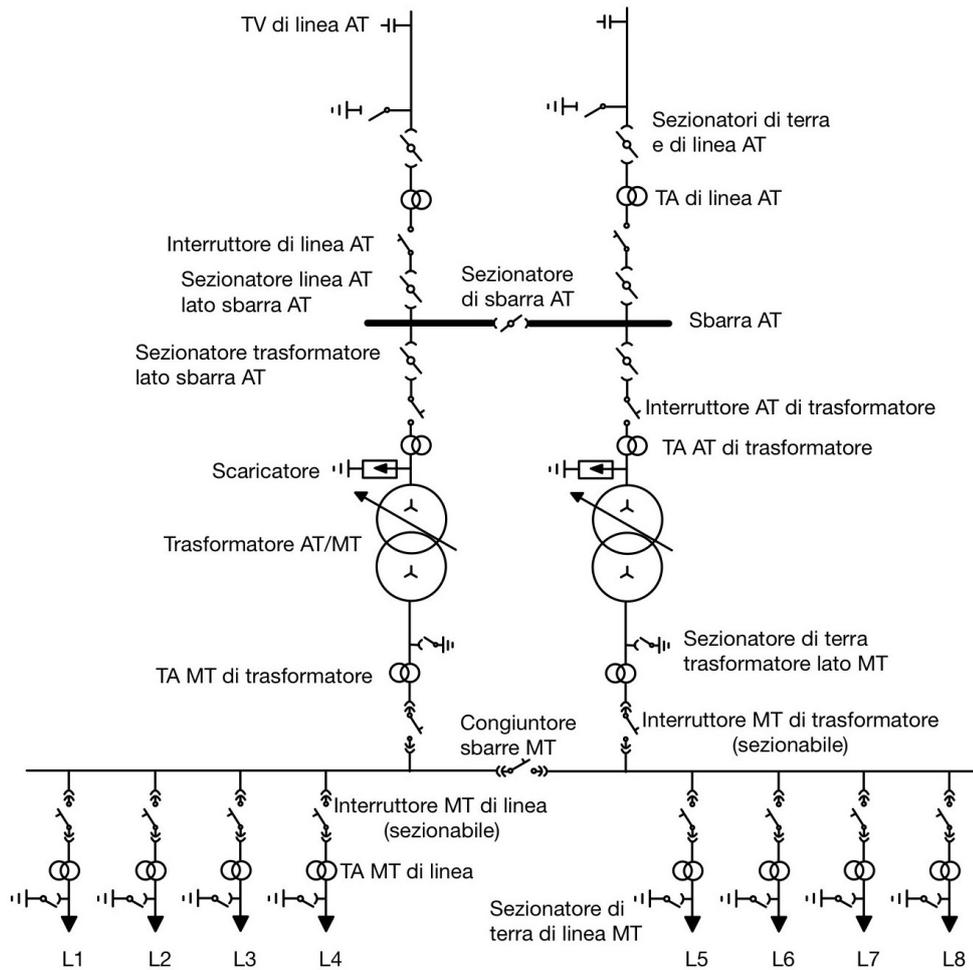


Figura 1.3: Schema unifilare cabina primaria

### 1.1.2 Automatismi e telecontrollo

Oggi giorno, attraverso l'automazione, l'intervento umano è sempre più limitato alla sola manutenzione periodica e alle riparazioni. Infatti, i nuovi dispositivi

consentono di eseguire operazioni da remoto grazie al sistema di telecontrollo. Ad esempio, se un operatore deve effettuare manutenzioni o operazioni, deve prima contattare il Centro operativo, che provvederà, dopo aver fornito l'autorizzazione a procedere, a gestire l'apertura o la chiusura degli interruttori in base alle necessità. All'interno di ogni cabina è presente il telecomando, un dispositivo che gestisce la trasmissione e la ricezione delle informazioni con il centro operativo. Per garantire il funzionamento del telecomando e dei sistemi di protezione anche in assenza di alimentazione dalla rete, questi dispositivi sono alimentati da un Uninterruptible Power Supply (UPS). Senza questa precauzione, un'interruzione dell'alimentazione, ad esempio dovuta a un fulmine che provoca l'apertura degli interruttori AT, potrebbe disattivare anche i servizi ausiliari. Per ovviare a questo problema, nelle cabine vengono utilizzati raddrizzatori, che convertono la corrente alternata a bassa tensione in corrente continua. Inoltre, per garantire la continuità operativa in caso di mancanza di alimentazione, vengono impiegate batterie di riserva, costantemente ricaricate dai raddrizzatori. Tipicamente, i dispositivi di protezione e i motori degli interruttori funzionano a 110 V, mentre il telecomando e i sistemi di comunicazione operano a 24 V[2].

## 1.2 Il cavo di media tensione

I trasferimenti di energia all'interno delle aree urbane di una rete di distribuzione avvengono attraverso cavi posati in tubi o canali interrati.

Il cavo è descritto come un conduttore di potenza uniformemente isolato, e rivestito solitamente da uno o più involucri. Esistono anche i cavi multipolari, formati da più conduttori singolarmente isolati e riuniti all'interno di una guaina e uno o più rivestimenti di protezione. La struttura è formata da più strati, ciascuno con un suo specifico compito.[3]



**Figura 1.4:** Cavo unipolare di media tensione - *Com Cavi S.p.A. Cavi elettrici di media tensione.*[4]

Il **conduttore** di potenza è fatto solitamente in rame o alluminio, quindi materiali ad alta conducibilità elettrica. A parità di resistenza elettrica, l'alluminio richiede una sezione 1,6 volte maggiore di quella del rame, però costa e pesa di

meno. È costituito da più fili elementari, opportunamente ricotti per migliorare le caratteristiche meccaniche, disposti ad elica su strati concentrici. Per diametri maggiori di  $16 \text{ mm}^2$  i conduttori vengono compattati per ottenere una forma superficiale quasi perfettamente cilindrica; questo processo consente di ridurre il diametro esterno. La sezione del cavo fa sempre riferimento alla sezione equivalente del conduttore di potenza.[3][5]

La parte che ricopre il conduttore è chiamata **isolante**, viene applicata per estrusione e serve appunto ad isolare il conduttore per ragioni di funzionamento e di sicurezza. Lo spessore di questo strato dipende dal livello di tensione di isolamento. Il parametro principale è la rigidità dielettrica, che sarebbe il massimo valore di tensione che l'isolante è in grado di sopportare, evitando la scarica elettrica e quindi la sua perforazione. Deve avere basse perdite dielettriche, che ne causano il riscaldamento e, inoltre, deve resistere anche a scariche parziali. I materiali utilizzati per la media tensione sono solitamente EPR oppure XLPE; resistono meglio ad alte temperature ( $T_{Max}$  di esercizio continuo  $90^\circ\text{C}$ ) e sono definiti isolanti termoindurenti, a differenza del classico PVC o PE ( $T_{Max}$  di esercizio continuo  $70^\circ\text{C}$ ) che invece con il calore tendono a deformarsi fino a sciogliersi.[3]

Sono presenti due strati di materiale **semiconduttivo**.

Il primo, interno, si trova tra il conduttore e l'isolante. Si utilizza perché la superficie esterna del conduttore non è liscia, e ciò porta a punti in cui il campo elettrico risulta più intenso a causa della presenza di aria, quindi ha lo scopo di equalizzarlo ed evitare irregolarità.

Il secondo, esterno, è invece applicato tra isolante e schermo. Si usa per cavi con tensioni maggiori di 3 kV.

Il termine semiconduttore deriva dal fatto che hanno una conducibilità intermedia tra quella di isolante e conduttore. Sono miscele polimeriche e vengono applicate per estrusione.[3]

Lo **schermo**, il cui utilizzo verrà approfondito nei prossimi capitoli, è un rivestimento metallico applicato esternamente al secondo strato di materiale semiconduttivo. Il suo scopo è confinare il campo elettrico generato dal cavo stesso, e proteggere il conduttore dai disturbi elettromagnetici esterni, e aumentare la sicurezza elettrica in caso di guasto. Esso, protegge in particolar modo l'isolante dal campo elettrico tangenziale, che può dare l'avvio a micro scariche. È formato da un sottile nastro di rame avvolto a spirale e applicato sull'insieme delle anime o singolarmente attorno all'isolante di ciascuna. È necessario per i cavi con tensione nominale di isolamento verso terra maggiore di 3,6 kV; nel caso di tensioni invece superiori a 8 kV, la schermatura deve essere adottata per ogni singola anima del cavo.[3]

L'**armatura** assolve funzioni di protezione meccanica da sollecitazioni esterne. Generalmente è in acciaio, tranne per i cavi unipolari in corrente alternata in cui vengono utilizzati altri materiali come alluminio e sue leghe oppure acciaio inox.

Questo strato può essere realizzato tramite fili rotondi, piattine o nastri.[3][5]

L'elemento che costituisce lo strato finale esterno è detto **guaina**.

È un rivestimento protettivo continuo e composto da materiale termoplastico applicato per estrusione, solitamente PVC o PE. Il suo spessore è di alcuni millimetri e il suo colore dà un'indicazione del tipo di cavo (es. rosso per quelli di media tensione). Non ha funzione di isolamento elettrico.[3]

### 1.3 I giunti dei cavi MT

Nei sistemi elettrici, i giunti dei cavi di media tensione sono componenti essenziali che consentono la continuità tra tratte di cavo. Una corretta progettazione e installazione, con particolare attenzione al collegamento degli schermi, è fondamentale per garantire l'affidabilità, l'efficienza e la sicurezza della rete.

L'estensione delle reti in cavo è in continuo aumento per sostenere l'evoluzione della rete elettrica, in particolare nei contesti urbani, dove la realizzazione di linee aeree risulta impraticabile. Le linee interrate offrono vantaggi significativi, tra cui una maggiore affidabilità operativa e un impatto visivo notevolmente ridotto.

Durante la posa di nuove linee, l'estensione di tratte esistenti o interventi di manutenzione, si rende necessario l'impiego di giunti. Questo perché i cavi hanno lunghezze limitate, determinate da fattori come il diametro, il peso e le modalità di trasporto. In genere, i giunti vengono installati ogni 300 metri, rendendone il numero potenzialmente elevato, soprattutto lungo le reti di distribuzione più estese.

Di conseguenza, i giunti rappresentano una componente fondamentale nelle reti in cavo, ma al tempo stesso costituiscono uno dei punti più critici in termini di affidabilità. Essi sono soggetti a numerosi tipi di sollecitazioni (meccaniche, termiche, elettriche e ambientali) e spesso vengono interrati a diversi metri di profondità, rendendo complesse le operazioni di ispezione e manutenzione.

Una delle principali sfide tecnologiche attuali è quindi migliorare l'affidabilità dei giunti, al fine di ridurre il numero di guasti nella rete. È noto, infatti, che i giunti rappresentano una delle cause più frequenti di guasto nelle linee di media tensione, con il cedimento dell'isolamento elettrico come modalità più ricorrente.

Considerando che la vita utile di un cavo è generalmente compresa tra i 30 e i 40 anni, quella di un giunto si limita a circa 7–8 anni. Inoltre, fattori come modalità di installazione, condizioni di posa e caratteristiche del terreno possono accelerarne significativamente il degrado, aggravato da eventuali difetti produttivi preesistenti.[6]

In caso di guasto, è necessario disalimentare il tratto di rete coinvolto fino al completamento della sostituzione del giunto, comportando alti costi di manutenzione, interruzioni del servizio e penali a carico del gestore.

### 1.3.1 Struttura

Il giunto è un punto in cui due o più cavi vengono uniti per garantire la continuità del circuito. Questo collegamento è progettato per assicurare la continuità elettrica, l'isolamento rispetto l'ambiente esterno, il supporto meccanico e la protezione fisica del cavo.

Esistono diverse tipologie di giunti, che si differenziano in base alla funzione svolta, al tipo di connessione, alla tipologia di cavo e ai materiali impiegati. La progettazione dei giunti è fortemente influenzata dai valori di corrente e tensione di esercizio, nonché dalle condizioni ambientali del luogo di installazione.[6]

Si distinguono principalmente due grandi categorie di giunti:

**Giunti termorestringenti** , illustrati in figura 1.5, realizzati con materiali polimerici che si contraggono con il calore fornito, ad esempio da una fiamma ossidrica.

**Giunti autorestringenti** , mostrati in figura 1.6, composti solitamente da gomma siliconica pre-espansa su un supporto rigido a spirale. Una volta posizionati sul cavo, la spirale viene rimossa, permettendo al materiale di aderire gradualmente.



**Figura 1.5:** Giunto termorestringente - *Raytech S.r.l. Giunti termorestringenti unipolari.*[7]



**Figura 1.6:** Giunto autorestringente - *Raytech S.r.l. Giunti termorestringenti unipolari.*[7]

Dal punto di vista dei materiali, la gomma siliconica utilizzata nei giunti autorestringenti offre eccellenti proprietà isolanti e un'elevata elasticità, caratteristica assente nel materiale polimerico impiegato nei giunti termorestringenti.

Oltre alla composizione, le due tipologie di giunti si differenziano per numerosi altri aspetti. Quelli autorestringenti sono prefabbricati in stabilimento mediante processi ad alta pressione e temperatura, che garantiscono elevati standard qualitativi. In fase di installazione, è sufficiente rimuovere il nucleo a spirale per permettere al giunto di aderire al cavo: un'operazione semplice e non invasiva che preserva la qualità assicurata dal processo produttivo. Al contrario, i termorestringenti richiedono un'installazione più articolata e delicata. Questo rende il processo più suscettibile a errori o difetti.

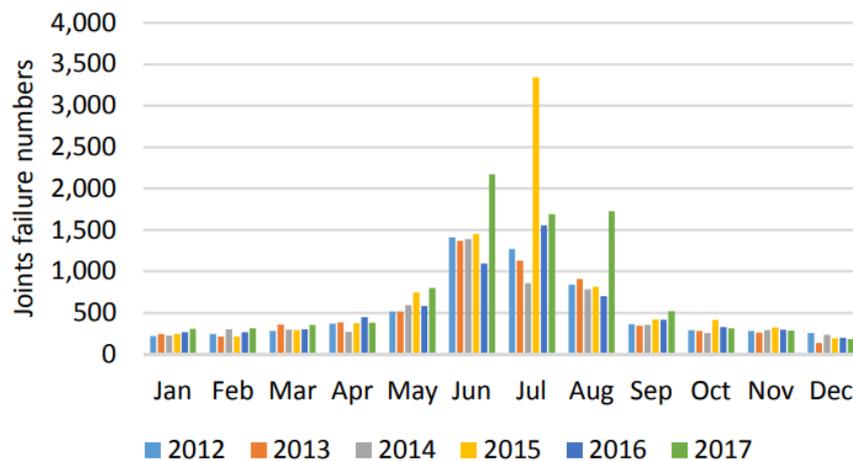
Dal punto di vista funzionale, i giunti autorestringenti, grazie alla loro elasticità, si adattano perfettamente al cavo anche in presenza di dilatazioni termiche, evitando la formazione di vuoti o l'ingresso di umidità, e mantenendo inalterate le prestazioni isolanti nel tempo. I termorestringenti, invece, risultano meno flessibili e più vulnerabili a sollecitazioni meccaniche e cicli termici, fattori che possono generare microdifetti all'interfaccia tra il cavo e il giunto. Per questi motivi, i primi sono oggi preferiti nella maggior parte delle applicazioni: offrono maggiore affidabilità, rapidità d'installazione, versatilità e prestazioni superiori in termini di isolamento e protezione meccanica del cavo.

### 1.3.2 Principali cause di guasto

In Italia, la rete di distribuzione elettrica in media tensione realizzata con cavi interrati si estende per circa 150.000 km, secondo le stime relative alle infrastrutture gestite dalle aziende distributrici. Considerando la frequenza media con cui vengono installati i giunti lungo queste tratte, circa 6 unità per ogni chilometro, si può dedurre che nel complesso il numero di giunti presenti sul territorio nazionale si aggiri intorno ai 900.000.[8]

Sulla base dei dati aggregati relativi ai guasti raccolti dai principali operatori elettrici, il tasso medio annuo di guasti riscontrati su linee in cavo interrato di media tensione risulta essere di circa 8 guasti ogni 100 km. Proiettando questo dato sull'intera rete, si ottiene una stima di 12.000 guasti all'anno a livello nazionale. Tra questi, si calcola che circa 9.000 siano imputabili direttamente ai giunti.[8]

La distribuzione di tali guasti non è uniforme, ma mostra forti differenze tra Nord e Sud Italia. Inoltre, si osserva una marcata stagionalità: nelle regioni meridionali, ad esempio, i mesi estivi registrano un aumento significativo dei guasti sui giunti, mentre nel Nord i valori annuali medi si attestano attorno ai 4 guasti ogni 100 km, contro i 10 guasti ogni 100 km riscontrabili in alcune aree del Sud.[8]



**Figura 1.7:** Numero di guasti ai giunti interrati delle linee di media tensione di e-distribuzione, suddivisi per mese dell'anno, nel periodo 2012-2017. - *L.Calcara et al.*, «*Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints*»[9]

È importante sottolineare che circa la metà della rete interrata è stata posata oltre quarant'anni fa, e presenta cavi con isolamento in carta impregnata. Il restante 50% è costituito da cavi più recenti con isolamento in polietilene reticolato (XLPE) o gomma etilenpropilenica (EPR).[8]

Dalle analisi statistiche effettuate sulle reti di e-distribuzione, proprietaria di oltre l'85% del sistema di distribuzione italiano, emerge che i guasti ai giunti sono dovuti quasi esclusivamente a errori di installazione, soprattutto quando non sono eseguiti da personale qualificato interno al distributore. Questa situazione è tuttora frequente, sebbene le grandi aziende abbiano ormai adottato politiche di installazione affidate a tecnici specializzati.

Solo una piccola percentuale dei guasti, infatti, risulta essere attribuibile al naturale processo di invecchiamento del materiale.(tabella 1.1) Si può quindi concludere che la principale causa di guasto nei giunti è da ricondurre alla non

corretta installazione, con eventi che possono verificarsi anche dopo brevi periodi dalla messa in servizio della linea.[8]

**Tabella 1.1:** Fattori di invecchiamento

Fattore	Meccanismo	Effetto
Termico	Alta temperatura e cicli termici	Reazioni chimiche Dilatazione termica Fusione dell'isolamento
	Bassa temperatura	Crepe Contrazione termica
Elettrico	Tensione	Scariche parziali Alberi elettrici Rottura intrinseca Perdite dielettriche
	Corrente	Surriscaldamento
Meccanico	Flessione ciclica, vibrazioni, sforzi	Cedimento dei materiali Crepe Rottura
Ambientale	Umidità, liquidi, gas	Tracking elettrico Alberi da umidità Corrosione Perdite dielettriche
	Radiazioni	Reazioni chimiche accelerate



**Figura 1.8:** Ispezione del giunto di un cavo interrato dopo il cedimento. - *L. Calcara et al.*, «*Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints*»[9]

Come già discusso in precedenza, i giunti rappresentano un elemento critico della rete in media tensione e, per tale motivo, sono tra i componenti più rilevanti da sottoporre a monitoraggio (figura 1.8). Le statistiche mostrano chiaramente come essi costituiscano una delle principali fonti di guasto nelle linee in cavo. Il tipo di anomalia più frequentemente riscontrata è il cedimento dell'isolamento elettrico, spesso attribuito al naturale processo di invecchiamento o all'usura del materiale isolante.

Tuttavia, il deterioramento dell'isolante, non è un evento lineare o monodirezionale, bensì un processo multifattoriale, frutto di una complessa interazione tra cause diverse, che possono innescare una varietà di modalità di guasto tra loro correlate.

Tra i modi di guasto più comuni si possono citare:

- la perforazione dell'isolante principale o di quello del cavo
- il cedimento termico del dielettrico
- guasti localizzati nella zona di collegamento dei conduttori
- danni alla guaina protettiva o all'interfaccia tra cavo e giunto

Le cause scatenanti sono molteplici e includono:

- scariche parziali
- fenomeni di treeing elettrico e water treeing, che possono essere sia effetto che causa di altri fenomeni
- sovratensioni e surriscaldamenti
- passaggio di correnti superiori ai valori di progetto
- difetti interni all'isolante
- stress meccanici e termici ripetuti
- infiltrazione di umidità o acqua
- episodi di fuga termica
- cedimenti strutturali o rilassamenti meccanici
- interruzioni o cortocircuiti nei conduttori

A queste si aggiungono cause legate alla qualità del componente o dell'installazione:

- invecchiamento accelerato dei materiali
- difetti di fabbricazione o qualità non conforme del prodotto
- scarsa resistenza meccanica del rivestimento esterno
- errori in fase di posa o installazioni non corrette

In sintesi, i guasti nei giunti non derivano da una singola causa isolata, ma piuttosto da una catena di eventi fisici, elettrici e meccanici che interagiscono nel tempo e che richiedono un approccio preventivo e integrato per essere efficacemente monitorati e contenuti.[6][10][11]

## 1.4 La rete di terra del sistema MT

Entrando nel dettaglio degli impianti di terra all'interno della rete di distribuzione, si vogliono chiarire gli effetti dell'utilizzo della schermatura dei cavi di media tensione.

### 1.4.1 Impianto di terra della sottostazione AT/MT

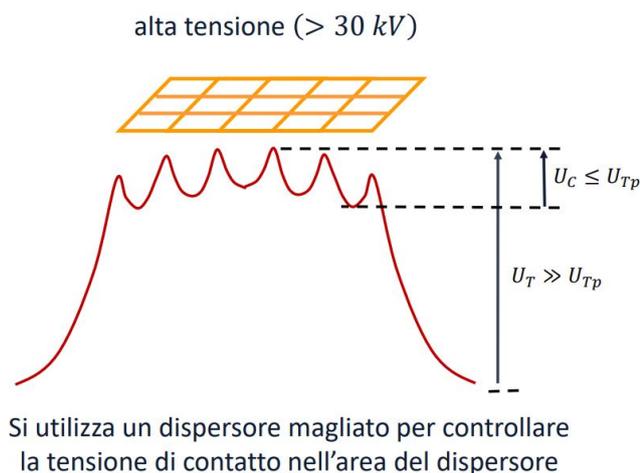
Il sistema di messa a terra ha il compito di limitare l'aumento del potenziale di terra in caso di guasto, assicurando una dissipazione sicura delle correnti ed evitando danni alle apparecchiature elettriche. È costituita da tutte le strutture di connessione presenti nell'area, comprese le funi di terra aeree (se presenti), la rete di terra e altri elementi. Facendo riferimento alle norme europee (CEI EN 50522: CEI EN 61936) sono possibili diverse configurazioni della messa a terra di installazioni elettriche, che prescrivono e fissano i vincoli per i progetti delle reti di terra in impianti con tensione nominale superiore a 1 kV in corrente alternata.[2] Gli impianti di terra sono costituiti da dispersori orizzontali e verticali, che formano una griglia utile a controllare la distribuzione di potenziale sulla superficie del terreno e contenere le tensioni di contatto al di sotto dei limiti normativi come indicato in figura 1.9.[3]

$U_C$  : tensione di contatto

$U_{Tp}$ : tensione di contatto ammissibile

$U_T$  : tensione totale di terra

La progettazione inizia con un'analisi del sito, che comprende la misura della resistività del terreno e la raccolta di dati geologici. L'impianto di terra della sottostazione AT/MT può essere interconnesso agli impianti di terra delle cabine MT/BT, oppure no.

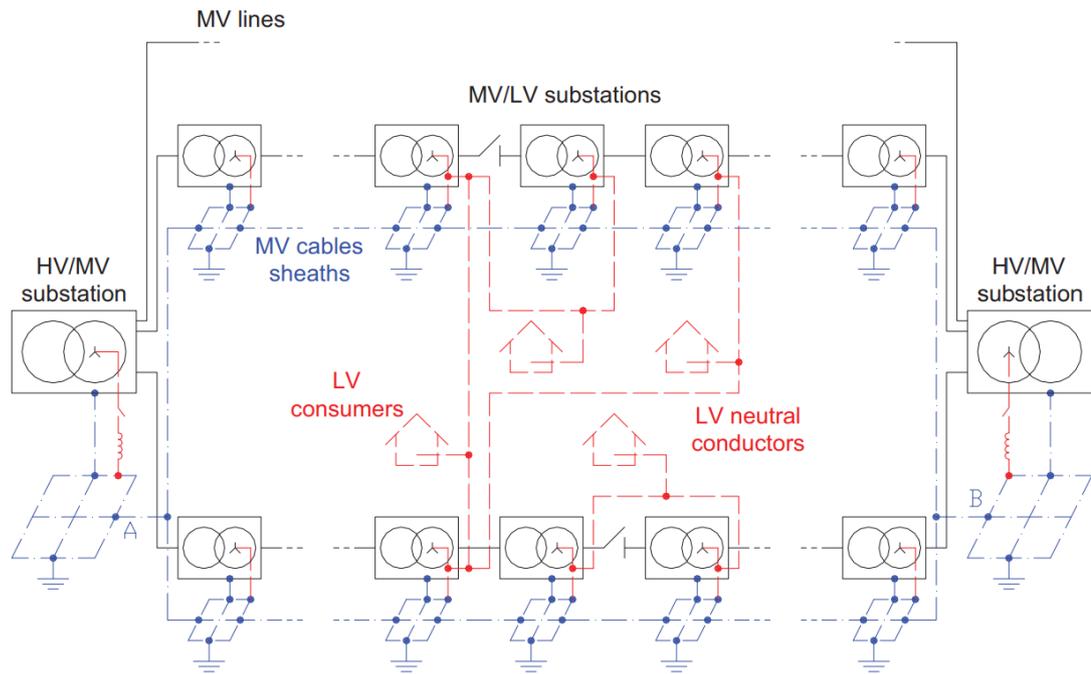


**Figura 1.9:** Maglia di terra della sottostazione AT/MT - *A. Russo e P. Colella. Slide delle lezioni del corso "Fondamenti di Impianti Elettrici", Politecnico di Torino*[3]

#### 1.4.2 Rete di terra del sistema MT

Le reti MT sono tipicamente esercite ad anello aperto, come mostrato in figura 1.2. Le dorsali MT in partenza dalla sottostazione AT/MT alimentano diverse cabine MT/BT secondo lo schema di collegamento entra-esci. In un punto della dorsale, i conduttori di fase vengono sezionati, così da garantire che la rete MT venga esercita radialmente. In caso di guasto, è possibile sezionare il guasto ed eventualmente rialimentare le cabine MT/BT da una diversa sottostazione AT/MT, diminuendo i disservizi per gli utenti. Ogni cabina MT/BT di esse sarà dotata di un impianto di terra. Questi impianti di terra saranno interconnessi dagli schermi dei cavi di media tensione, da eventuali trecce di rame interrate a contatto con il terreno, e dai neutri di bassa tensione.(figura 1.10)

La rete di terra risultante è quindi magliata ed in caso di guasto sul sistema MT, la corrente non viene iniettata dal solo impianto di terra guasto ma da numerosi impianti di terra, contribuendo a migliorare la sicurezza elettrica del sistema. Questo effetto è particolarmente evidente all'aumentare della densità di cabine MT/BT.



**Figura 1.10:** Rete in media tensione - Impianto di terra globale - A. Russo e P. Colella. Slide delle lezioni del corso "Fondamenti di Impianti Elettrici", Politecnico di Torino[3]

## Capitolo 2

# Collegamento degli schermi dei cavi MT all'impianto di terra della sottostazione AT/MT

In questo capitolo si affronta il ruolo che hanno i collegamenti degli schermi dei cavi nella rete di distribuzione, in particolar modo alle cabine di trasformazione. Si vuole esaminare l'interazione di questa pratica con gli impianti di terra, sottolineando i risvolti dal punto di vista della stabilità, protezione da sovratensioni e sicurezza. Implementare strategie di progettazione adeguate è dunque una scelta essenziale per il miglioramento del sistema. Infine, vengono commentati degli studi effettuati sui cavi schermati con il metodo degli elementi finiti.

### 2.1 Correnti negli schermi dei cavi MT

Una sollecitazione che può comportare lo scoppio di un giunto MT è quella dovuta agli effetti termici provocati dalle correnti di guasto che attraversano gli schermi metallici. Ciò accade specialmente nei sistemi elettrici a neutro compensato. In questi sistemi, la corrente di guasto permane per un tempo più lungo per consentire una più rapida localizzazione del guasto, tramite gli interruttori automatici di sezionamento. Durante questo periodo, le correnti attraversano gli schermi metallici dei cavi, surriscaldandoli soprattutto in corrispondenza di eventuali connessioni all'interno dei giunti. Nel caso in cui il singolo guasto a terra si trasformi in un doppio guasto a terra, lo stesso schermo sarà interessato da una corrente molto

più elevata, che causerà un maggiore deterioramento degli strati semiconduttori e dell'isolamento.[12]



**Figura 2.1:** Collegamento danneggiato tra lo schermo del cavo e lo schermo del giunto. - A.Sturchio et al., «*Thermal behavior of distribution MV underground cables*»[12]

Con l'obiettivo di determinare la causa del guasto di un giunto, è sempre necessaria un'ispezione visiva dello stesso. Come si può vedere in figura 2.1, sono stati riscontrati importanti segni di deterioramento in corrispondenza degli schermi metallici e degli strati semiconduttori circostanti. Questa osservazione permette di ritenere possibile che gli schermi metallici e i composti circostanti siano stati sottoposti a eccessive sollecitazioni termiche. Infatti, con messa a terra del neutro attraverso la bobina di Petersen, il singolo guasto fase-terra comporta una circolazione di corrente negli schermi metallici dei cavi dell'ordine dei 50 A che viene mantenuta per alcuni secondi in modo tale da localizzare il guasto(figura 2.2).

Questa corrente può comportare un surriscaldamento delle connessioni degli schermi presenti nei giunti della linea interessata. Questa sollecitazione può determinare un cedimento del giunto, con il manifestarsi di un doppio guasto a terra(figura 2.3). La conseguenza è che i giunti della linea vengono ulteriormente sollecitati. Per limitare questo fenomeno, avendo l'accortezza di rispettare i limiti delle tensioni totali di terra in tutte le cabine MT/BT della rete, può essere fortemente limitato prevedendo la disconnessione degli schermi metallici a terra di alcune cabine secondarie. L'adozione di questa soluzione potrebbe consentire una significativa

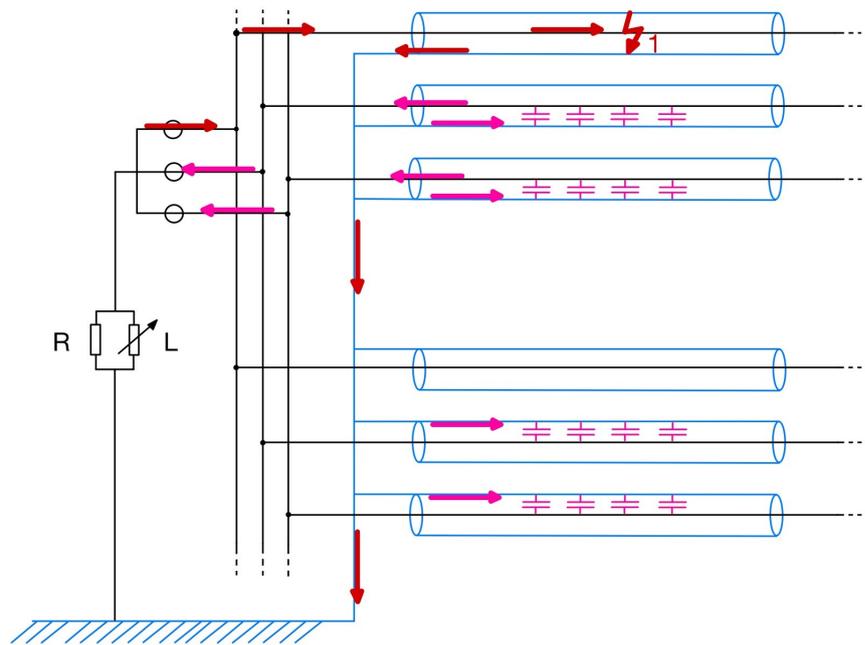


Figura 2.2: Schema di un singolo guasto fase-terra in una rete a neutro compensato

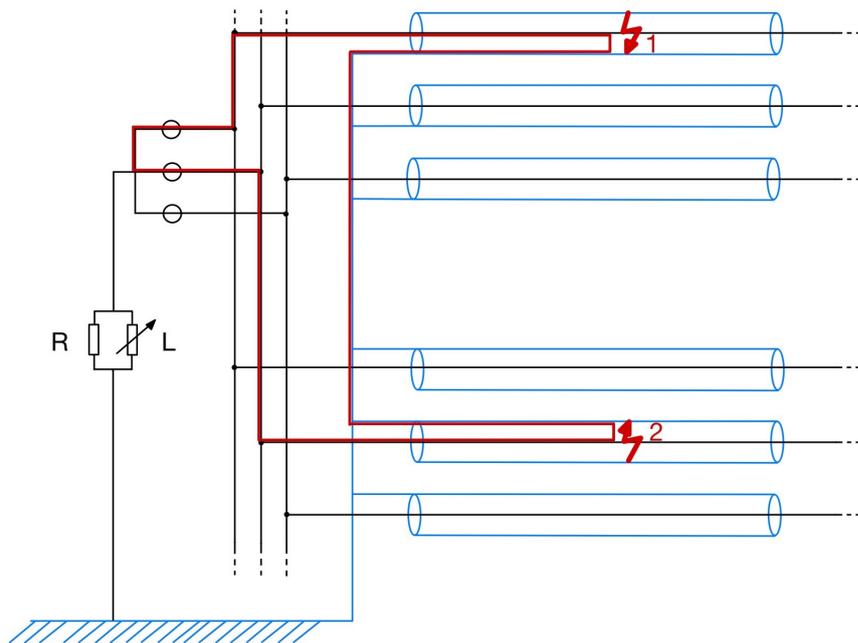
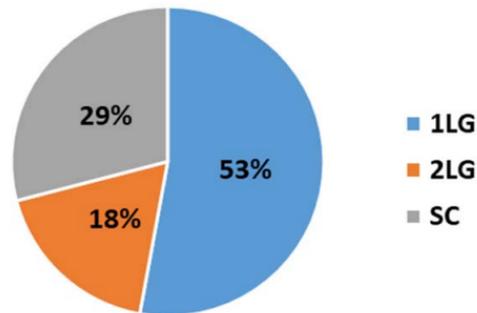


Figura 2.3: Schema di un doppio guasto fase-terra in una rete a neutro compensato

riduzione dei tassi di guasto dei giunti.[12]

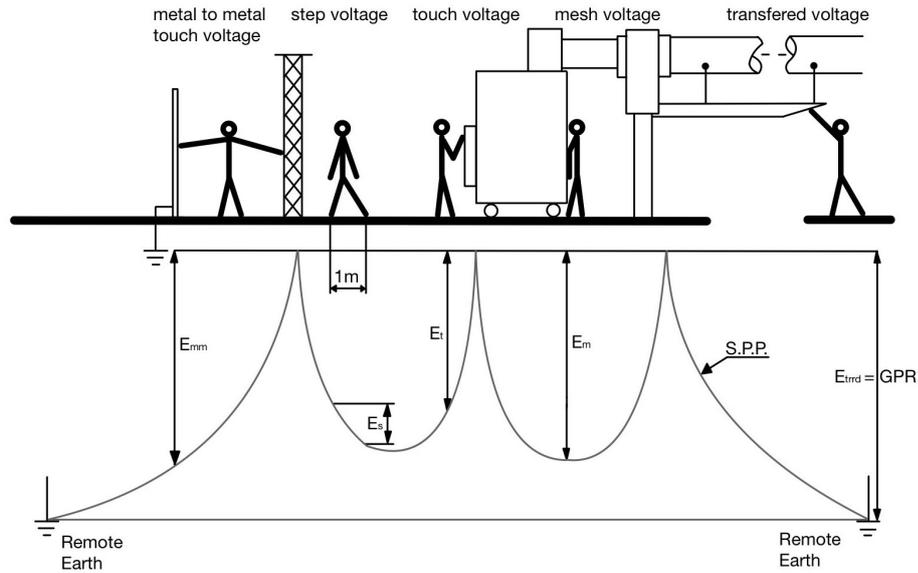


**Figura 2.4:** Numero di interruzioni dovute a guasti di giunti e cavi MT (in % sul totale nel periodo 2013-2017) nella rete di e-distribuzione, suddivise per tipo di guasto: guasto fase-terra (1LG), doppio guasto fase-terra (2LG) e guasto da cortocircuito (SC). - *L. Calcara et al., «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints»*[9]

## 2.2 Potenziali trasferiti e correnti sul sistema di MT dovute ad un evento di fulminazione sul sistema AT

Un parametro fondamentale negli impianti di terra è il GPR (Ground Potential Rise), ovvero l'innalzamento del potenziale di terra. Esso rappresenta il massimo potenziale elettrico che la rete di terra di una sottostazione può raggiungere rispetto a un punto di riferimento posto al potenziale della terra lontana. Il suo valore è dato dal prodotto tra la massima corrente di terra e la resistenza della rete di terra. Risulta particolarmente rilevante per la valutazione della tensione di contatto trasferita, sia all'interno che all'esterno della sottostazione. Un caso critico si verifica quando una persona situata in un punto remoto entra in contatto con un oggetto collegato all'impianto di terra della sottostazione, potenzialmente esponendosi a una differenza di potenziale pericolosa.[13].(figura 2.5)

Il GPR è un fenomeno che si verifica quando grandi quantità di elettricità entrano nella terra, nella maggior parte dei casi quando si verifica un guasto nelle sottostazioni o nelle torri ad alta tensione oppure quando si verificano fulmini. Queste correnti entrano nel terreno attraverso l'impianto di terra, e non solo il sistema di messa a terra aumenterà il suo potenziale elettrico, ma anche il terreno circostante. Le tensioni prodotte possono essere pericolose sia per il personale che per le apparecchiature. Le differenze di potenziale risultanti causeranno il flusso di correnti in tutti i corpi conduttivi a terra nelle vicinanze.[13]



**Figura 2.5:** Possibili situazioni di rischio elettrico a seguito di potenziali pericolosi

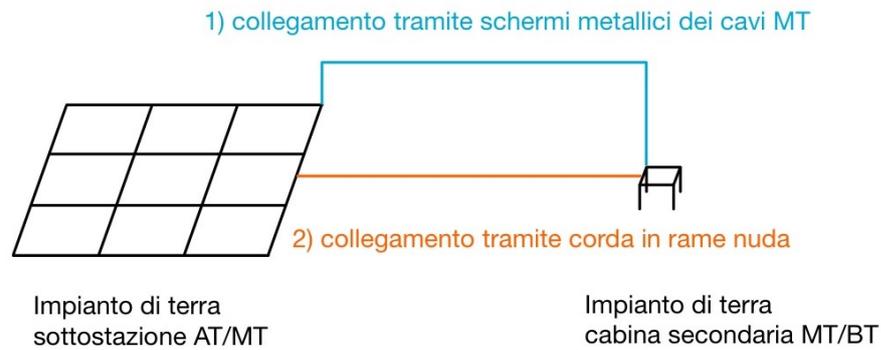
Collegare lo schermo dei cavi MT all'impianto di terra della sottostazione AT/MT, in alcuni scenari potrebbe rivelarsi utile in quanto l'impianto di terra della sottostazione è tipicamente caratterizzato da bassi valori di resistenza di terra e questo favorisce il mantenimento della tensione totale di terra entro i limiti indicati dalla normativa di riferimento. In altri scenari, ad esempio un guasto sul sistema AT oppure un evento di fulminazione diretta sul sistema AT, potrebbe comportare delle correnti negli schermi dei cavi MT che altrimenti non si avrebbero ed anche al trasferimento di potenziali pericolosi dalle sottostazioni alle cabine secondarie non guaste.[14]

Studi effettuati dal Dipartimento di Energia Elettrica dell'Università degli Studi di Palermo, ci permettono di valutare se l'interconnessione, solitamente realizzata per ridurre l'innalzamento del potenziale di terra durante il guasto monofase a terra, possa dare luogo a situazioni pericolose anche all'impianto più lontano rispetto al punto della scarica elettrica atmosferica.[14]

I due casi presentati e commentati riguardano:

1. sottostazione AT/MT collegata a una cabina MT/BT tramite schermi dei cavi
2. sottostazione AT/MT collegata a una cabina MT/BT tramite corda in rame

In figura 2.6 è riportata la rappresentazione dei due impianti di terra interconnessi e distanti 500 m.



**Figura 2.6:** Collegamenti tra impianti di terra

L'impianto di terra della sottostazione è formato da una rete 60x60 m. Gli elementi orizzontali sono distanti 20 m l'uno dall'altro. L'impianto di terra della cabina secondaria è formato da un rettangolo 3x6 m ai cui spigoli sono presenti quattro picchetti da 1,5 m. Entrambi gli impianti sono realizzati in rame con sezioni dei conduttori pari a 35 mm<sup>2</sup>. La profondità di interrimento è 0,8 m.

L'ipotesi è quella di fulminazione diretta, con forma d'onda di corrente a doppio esponenziale 1,2/50 µs/µs e valore di picco pari a 10 kA, in corrispondenza di uno degli elettrodi di terra della cabina primaria.

La linea trifase è costituita da cavi unipolari ARG7H1R 10/20 kV, aventi schermo in rame con sezione equivalente pari a 6 mm<sup>2</sup>.

La sezione totale equivalente è quindi di 3x6 mm<sup>2</sup> nel caso di interconnessione tramite schermi, oppure di 35 mm<sup>2</sup> nel caso di collegamento effettuato tramite corda in rame nudo.

### **Sottostazione AT/MT collegata a una cabina MT/BT tramite schermi dei cavi**

Il fattore di riduzione della corrente di fulmine (coefficiente che tiene conto della ripartizione della corrente di fulmine tra più percorsi) dovuto all'interconnessione,

come definito da IEEE Std. 80/2013, varia per diversi valori della resistività del terreno e della lunghezza dello schermo. Si veda tabella 2.1

**Tabella 2.1:** Fattore di riduzione della corrente di fulmine in funzione della resistività del terreno e della lunghezza L degli schermi

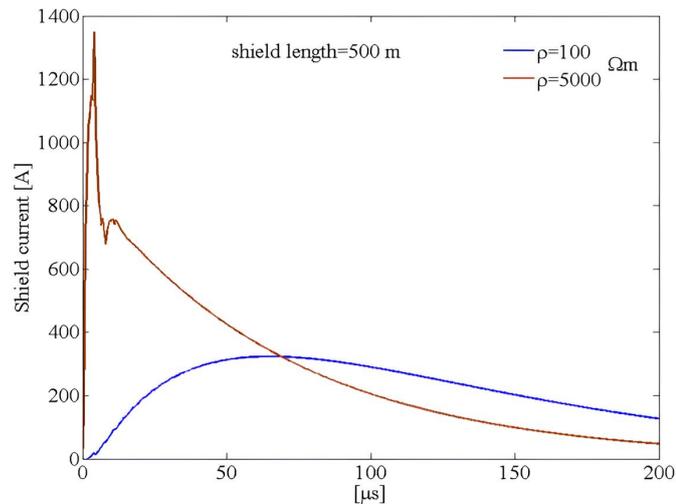
$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	L [m]			
	50	100	200	500
100	0,57	0,61	0,64	0,56
500	0,53	0,54	0,55	0,52
1000	0,52	0,52	0,53	0,51
5000	0,49	0,42	0,40	0,38

In tabella 2.2 è riportato il valore di  $i^2t$  nello schermo metallico. I valori simulati risultano sotto al  $K^2S^2$  dei cavi, secondo la IEC 61936-1 pari a  $6,62e+06 A^2s$ .

**Tabella 2.2:** Valore di  $i^2t$  nello schermo metallico dei cavi

$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	L = 50 m	L = 100 m	L = 200 m	L = 500 m
100	7,99e+02	7,69e+02	7,33e+02	7,77e+02
500	8,31e+02	8,25e+02	8,16e+02	8,61e+02
1000	8,35e+02	8,32e+02	8,27e+02	9,27e+02
5000	8,40e+02	8,42e+02	8,51e+02	1,28e+03

In figura 2.7, per due valori di resistività del terreno, è riportato il profilo temporale della quota di corrente di fulmine che attraversa lo schermo dei cavi. Quando la scarica atmosferica colpisce la sottostazione, la maggior parte della corrente di fulmine viene iniettata nel terreno in quanto la resistenza di passaggio verso terra è minore. La quota di corrente che fluisce verso la cabina è solo una piccola parte compresa tra il 3%, quando la resistività del terreno è  $100 \Omega \cdot \text{m}$ , e il 13% quando la resistività è  $5000 \Omega \cdot \text{m}$ . Per quanto riguarda l'energia che transita negli schermi dei cavi non sussistono problemi in quanto la sollecitazione termica dell'evento risulta non significativa. In caso di più cabine secondarie connesse alla sottostazione, la situazione migliora perché la corrente viene ulteriormente suddivisa in più dorsali, proprio come accade nel caso reale.



**Figura 2.7:** Profili temporali di corrente nella sezione equivalente totale degli schermi dei cavi - *G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»*[14]

### Sottostazione AT/MT collegata a una cabina MT/BT tramite corda in rame

Le sezioni minime del conduttore di terra dipendono dal materiale utilizzato e sono regolamentate dalle normative tecniche come la CEI 64-8 in Italia o la IEC 60364 a livello internazionale.

**Tabella 2.3:** Sezioni minime del conduttore di terra CEI 64-8 e IEC 60364.

Materiale	Sezione minima [mm <sup>2</sup> ]
Rame	16
Alluminio	25
Acciaio zincato	50

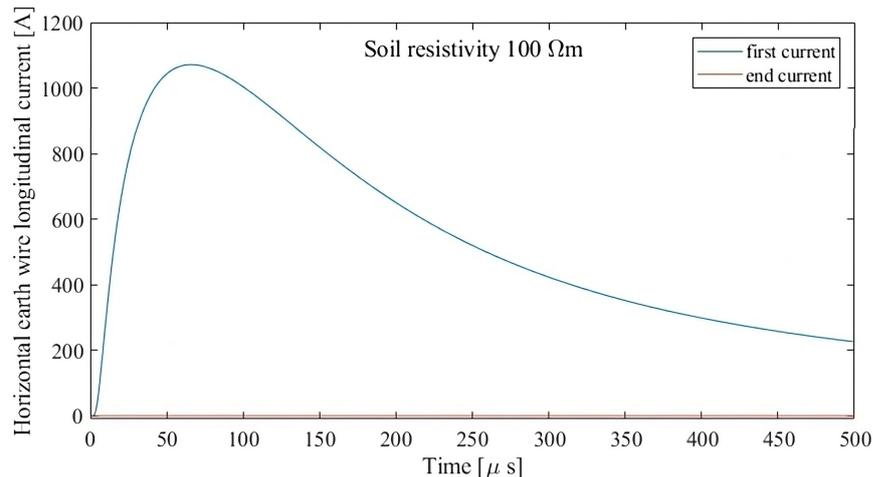
Se il conduttore è protetto meccanicamente, la sezione minima può essere ridotta a 6 mm<sup>2</sup> per il rame. Conduttori in alluminio e acciaio richiedono sezioni maggiori per compensare la loro minore conducibilità rispetto al rame. Per gli impianti industriali o situazioni particolari (ad esempio, dispersione di fulmini), la sezione può essere superiore a questi valori minimi.

In questo caso la corda in rame che collega i due impianti di terra ha sezione equivalente pari a 35 mm<sup>2</sup>.

Le figure 2.8 e 2.9 mostrano i profili di corrente nel tempo attraverso la corda, considerando due casi di resistività del terreno diversi e rispettivamente pari a  $100 \Omega \cdot m$  e  $5000 \Omega \cdot m$ . La distanza tra le due cabine è di 500 m. In entrambe le figure, viene rappresentata la corrente in ingresso e uscita nella corda. Come si può vedere, la corrente che arriva alla cabina è trascurabile perché viene iniettata nel terreno dalla corda stessa. Quindi, la corrente in ingresso e quella in uscita sono diverse.

Vale la pena notare che, anche in questo scenario, la quota di corrente che fluisce verso l'impianto di terra della cabina è una percentuale della corrente di sorgente iniettata nell'impianto di terra della sottostazione.

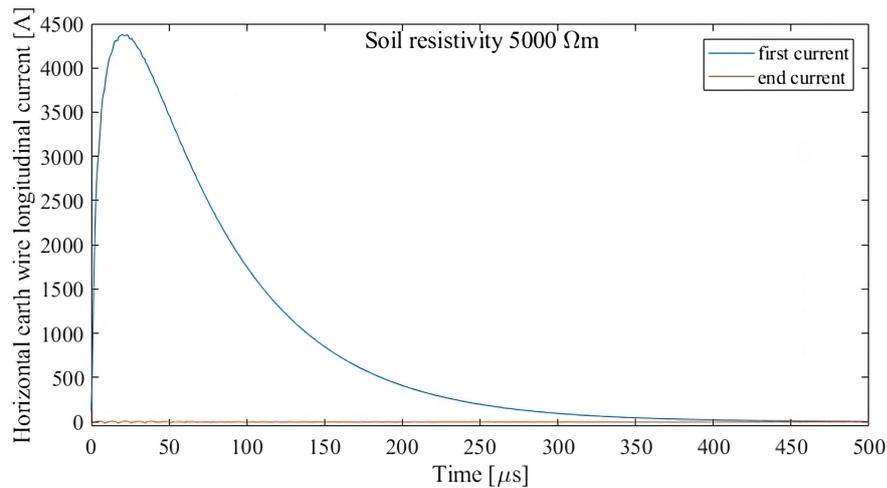
Il valore di corrente iniettata all'ingresso della corda è pari a circa l'11% della corrente di picco del fulmine (10 kA) quando la resistività del terreno è impostata a  $100 \Omega \cdot m$ , e pari a circa il 44% quando la resistività è  $5000 \Omega \cdot m$ . Anche in questo caso, i valori dell'energia passante nella corda di rame interrata non comportano alcuna sollecitazione termica significativa.



**Figura 2.8:** Profilo corrente nella corda di rame in terreno a bassa resistività  $100 \Omega \cdot m$  e distanza tra cabine pari a 500 m - *G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»*[14]

## Conclusioni

Le simulazioni precedentemente presentate dimostrano che l'aumento del rischio dovuto al trasferimento di potenziali tra due impianti di terra interconnessi a seguito di una corrente di fulmine è trascurabile, soprattutto quando il collegamento è realizzato utilizzando corda di rame interrata.



**Figura 2.9:** Profilo corrente nella corda di rame in terreno ad alta resistività  $5000 \Omega \cdot m$  e distanza tra cabine pari a 500 m - *G.Ala et al., «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids»*[14]

Inoltre, i due scenari esaminati sono dalla parte della sicurezza, dato che in una situazione reale il numero di impianti di terra interconnessi è notevolmente superiore a due, e di conseguenza la corrente di fulmine si suddivide in più parti. Pertanto, la corrente trasferita dall'impianto colpito dal fulmine a un altro sarebbe inferiore a qualsiasi valore riscontrato in quei due casi studio.

## 2.3 Tensione indotta negli schermi da armoniche e carenze nelle procedure di installazione

Le tensioni indotte nella schermatura del cavo di media tensione sono un fattore determinante per le sue prestazioni, poiché un valore molto elevato può portare a diverse conseguenze, come[15]:

- deterioramento dell'isolamento a causa di surriscaldamento
- circolazione di correnti
- rischi per le persone, a causa di scosse elettriche, in caso di contatto con parti dell'impianto di terra collegate vicino allo schermo

- malfunzionamento degli impianti elettrici.

Questi effetti, a loro volta, dipendono dall'entità della corrente di carico trasportata dal cavo, dalla temperatura del mezzo in cui il cavo è posato e dalle caratteristiche della qualità dell'alimentazione.

La guida IEEE 575 per il collegamento di schermature e guaine di cavi di potenza a singolo conduttore con tensione nominale da 5 kV a 500 kV, stabilisce i limiti di tensioni indotte nello schermo metallico considerando diverse configurazioni e disposizioni. In Italia non è stato concordato un valore di tensione fisso, ma le parti metalliche esposte sono in genere limitate a circa 25 V.[16]

Gli andamenti della tensione e della corrente indotta sulla guaina metallica del cavo variano in base alle condizioni di installazione, all'effetto delle armoniche nella rete e alla lunghezza del cavo. In caso di tensioni indotte elevate, la procedura di posa del cavo deve essere migliorata, incorporando buone pratiche come la trasposizione e la messa a terra degli schermi.[15]

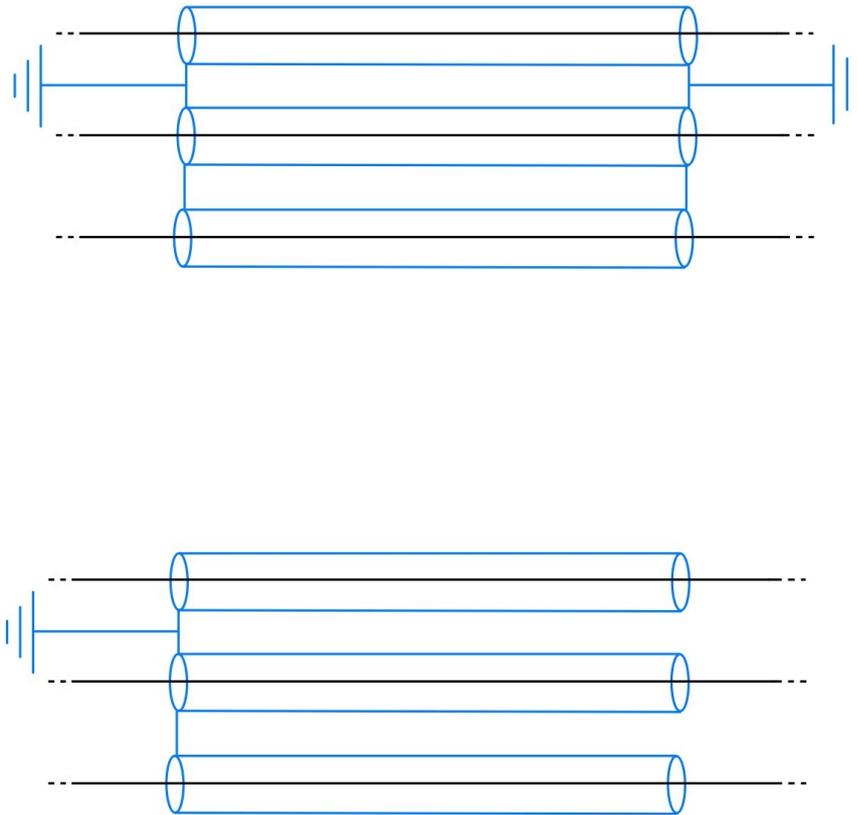
In presenza di armoniche e sovrarmoniche di rete, la tensione indotta nella schermatura del cavo aumenta fino a nove volte rispetto al caso base di assenza di armoniche nel sistema, ma con una trasposizione e una messa a terra adeguata, la tensione indotta aumenta solo di tre volte.[15] La causa principale della distorsione armonica all'interno della rete è principalmente dovuta ai convertitori statici di potenza.

### **2.3.1 Modalità di posa dei cavi**

Le induzioni di tensione e corrente nello schermo metallico dei cavi dipendono da[17]:

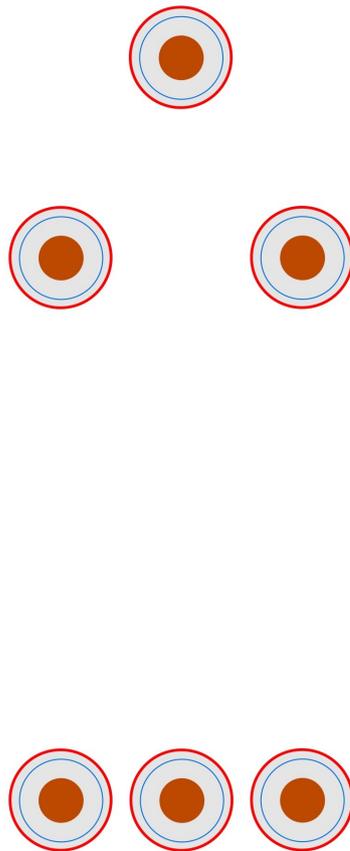
- profondità di posa;
- distanze tra fasi;
- lunghezza di trasposizione;
- configurazione di messa a terra dello schermo metallico;
- presenza di corde nude di terra;
- resistività del terreno;
- lunghezza della linea.

Inoltre, un'elevata corrente nello schermo metallico dei cavi, di natura capacitiva a causa dei ritorni con il terreno, è dovuta anche alla prossimità di altri cavi inter-rati, a carenze nella trasposizione e alla scarsa connessione delle messe a terra. Da evidenze sperimentali, si è constatato che se un cavo unipolare con sezione  $120 \text{ mm}^2$  e tensione isolamento verso terra da  $15 \text{ kV}$  viene attraversato da una corrente di  $300 \text{ A}$ , la tensione indotta è circa  $5,5 \text{ V}$  ogni  $100 \text{ m}$ . Un modo per ridurre le perdite dello schermo consiste nel metterlo a terra solo da un lato, lasciare quindi il "circuito aperto". In questo caso, si verifica un accumulo di tensione longitudinale. La pratica comune è quindi quella di mettere a terra gli schermi dei cavi da entrambi i lati.[18]



**Figura 2.10:** Schermi dei cavi connessi da entrambi i lati (sopra) e da solo un lato (sotto)

La disposizione dei conduttori di una linea trifase ha impatto sullo schermo metallico sia dal punto di vista delle tensioni indotte che delle correnti interne di circolazione e relative perdite. Come si può vedere in figura 2.11 esistono due tipi di configurazioni:



**Figura 2.11:** Configurazione a trifoglio (sopra) e configurazione piana (sotto)

Vengono adesso presentati e commentati degli studi effettuati dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Mosul[17].

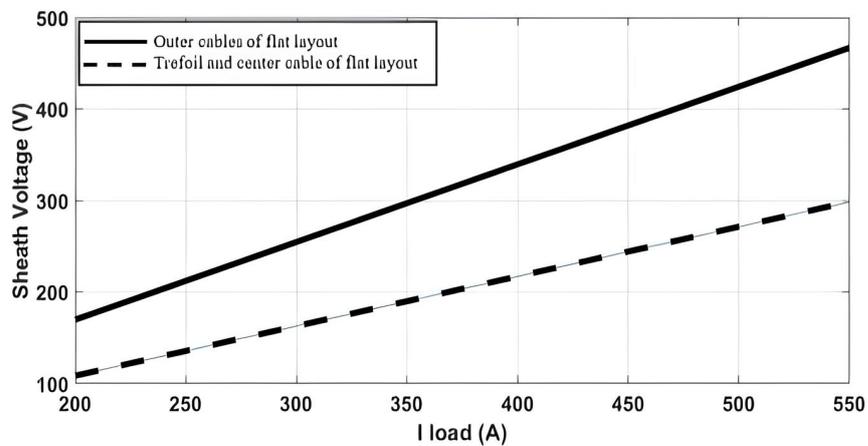
Simulazioni in ambiente Matlab-Simulink sono state effettuate, in entrambe le configurazioni, su una linea trifase in cavo composta da conduttori unipolari con sezione  $400 \text{ mm}^2$  da 19/33 kV e sono stati ottenuti i seguenti risultati:

**Schermi connessi a terra solo da un lato per vedere gli effetti delle tensioni indotte, lunghezza linea di 10 km e spaziatura tra cavi di 5 cm**

Come si può vedere in figura 2.12, all'aumentare della corrente di carico nell'intervallo (200 ÷ 550) A, le tensioni indotte sugli schermi aumentano.

Interessante è vedere che le tensioni degli schermi dei cavi più esterni, linea continua, nella configurazione piana (170 ÷ 475) V siano maggiori rispetto quella dello schermo del cavo in posizione centrale (109 ÷ 304) V.

I valori di tensione dei tre schermi in configurazione a trifoglio, linea tratteggiata, invece sono uguali (109 ÷ 304) V, e risultano essere gli stessi del cavo in posizione centrale della configurazione piana.

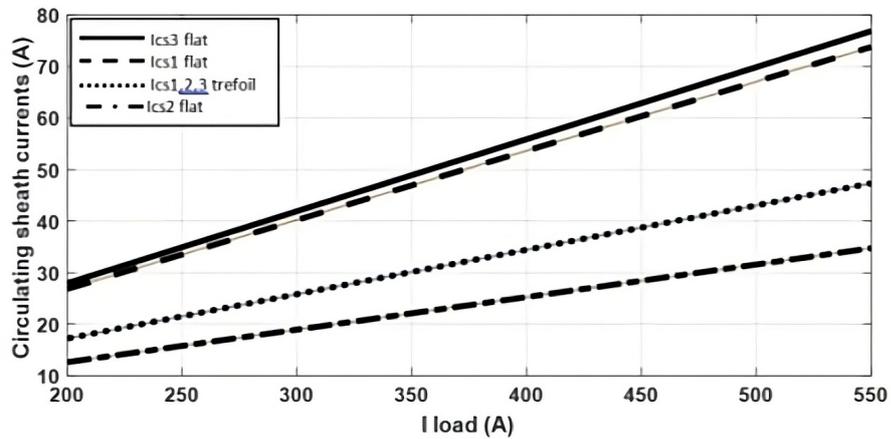


**Figura 2.12:** Tensioni indotte negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da solo un lato - *M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»*[17]

**Schermi connessi a terra da entrambi i lati per vedere gli effetti delle correnti di circolazione, lunghezza linea di 10 km e spaziatura tra cavi di 5 cm**

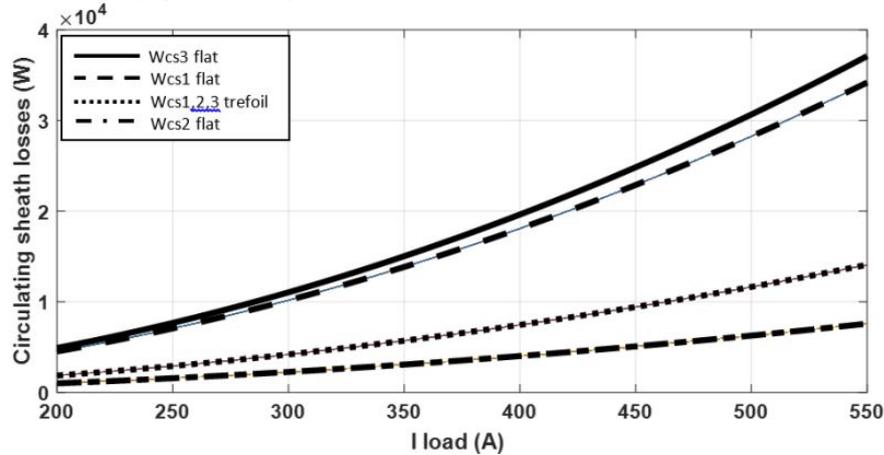
Come mostrato in figura 2.13, all'aumentare della corrente di carico nell'intervallo (200 ÷ 550) A, le correnti di circolazione all'interno degli schermi aumentano. Queste correnti risultano inferiori nella configurazione a trifoglio (17 ÷ 48) A e nello schermo centrale della configurazione piana (12 ÷ 35) A.

Risultano invece superiori negli schermi dei cavi più esterni della configurazione piana (27 ÷ 78) A e (26 ÷ 75) A.



**Figura 2.13:** Correnti di circolazione negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da entrambi i lati - *M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»*[17]

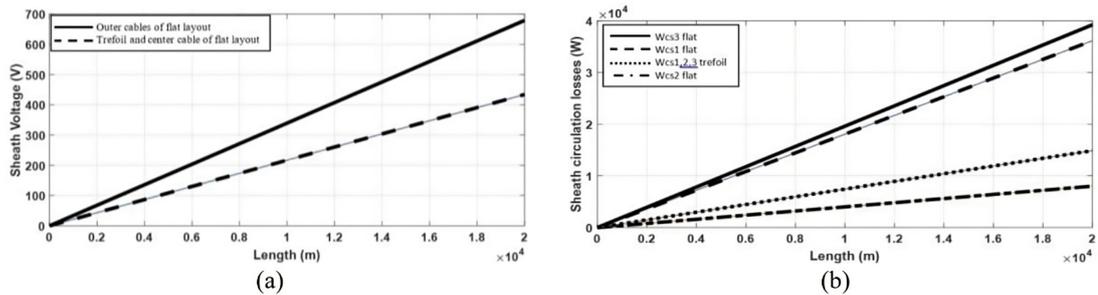
L'aumento della circolazione di queste correnti comporta un surriscaldamento.(figura 2.14)



**Figura 2.14:** Potenza dissipata negli schermi al variare della corrente di carico, configurazioni a trifoglio e piana, schermi connessi a terra da entrambi i lati - *M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»*[17]

Fissata la corrente di carico a 400 A si vedono gli effetti della variazione di lunghezza della linea, spaziatura tra cavi di 5 cm

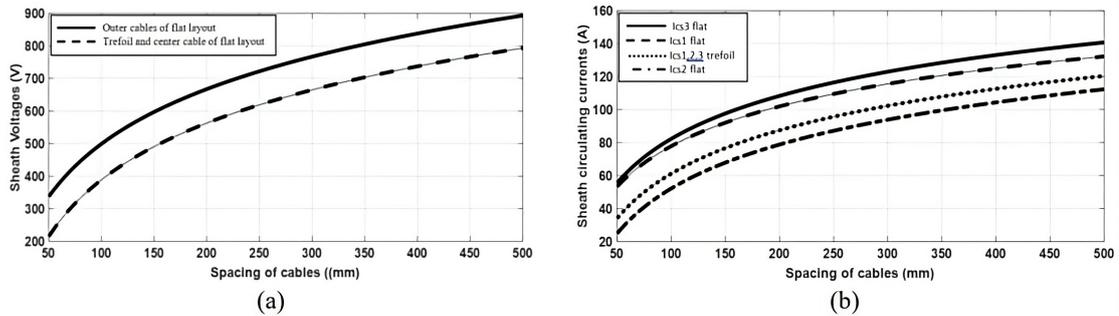
Dalla figura 2.15 si nota l'effetto di variazione della lunghezza dei cavi sui valori delle tensioni degli schermi (nel caso di un solo terminale collegato a terra) e sulla circolazione di correnti (nel caso di entrambi i terminali collegati a terra).



**Figura 2.15:** (a)tensione degli schermi al variare della lunghezza (b)perdite di circolazione al variare della lunghezza - *M.N.Abed et al., «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»*[17]

Fissata la corrente di carico a 400 A e la lunghezza del cavo a 10 km si vedono gli effetti della spaziatura tra cavi

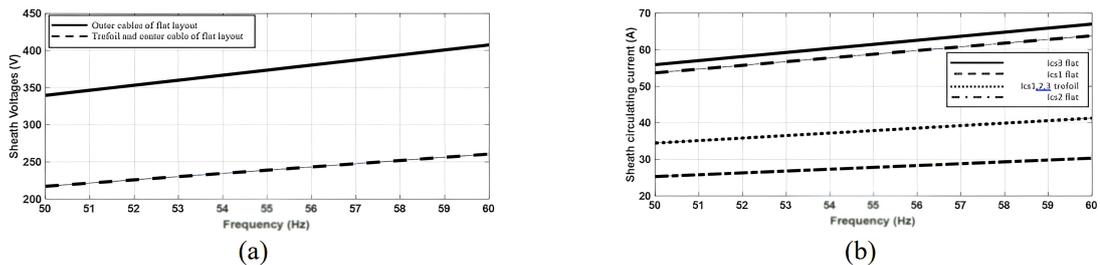
L'effetto di variazione della spaziatura tra cavi adiacenti ricade sui valori delle tensioni degli schermi (nel caso di un solo terminale collegato a terra) e circolazione di correnti (nel caso di entrambi i terminali collegati a terra).(figura 2.16)



**Figura 2.16:** (a)tensione degli schermi al variare della spaziatura tra cavi (b)correnti di circolazione al variare della spaziatura tra cavi - *M.N.Abed et al.*, «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»[17]

Fissata la corrente di carico a 400 A, la lunghezza a 10 km e la spaziatura tra cavi a 5 cm si vedono gli effetti della variazione di frequenza di rete

L'effetto di variazione della frequenza di rete ricade sui valori delle tensioni degli schermi (nel caso di un solo terminale collegato a terra) e circolazione di correnti (nel caso di entrambi i terminali collegati a terra).(figura 2.17)



**Figura 2.17:** (a)tensione degli schermi al variare della frequenza di rete (b)correnti di circolazione al variare della frequenza di rete - *M.N.Abed et al.*, «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink»[17]

Le conclusioni che si possono trarre da queste simulazioni sono:

- la configurazione a trifoglio risulta migliore della configurazione piana sia dal punto di vista delle tensioni indotte che delle correnti di circolazione negli schermi
- lunghezza del cavo e corrente di carico dei conduttori incrementano in maniera proporzionale sia le tensioni che le correnti negli schermi
- l'elevato valore delle capacità verso terra dei cavi media e alta tensione, a causa delle loro elevate tensioni di isolamento, pone limiti stringenti alle lunghezze della linea
- quando entrambi i lati degli schermi sono connessi a terra è meglio ridurre il fattore di carico del cavo, a causa delle correnti negli schermi che causano surriscaldamento
- è preferibile, in entrambe le configurazioni, disporre le fasi più vicine tra loro sia per diminuire la tensione che la corrente negli schermi, a causa del loro incremento di tipo logaritmico con la spaziatura
- dal punto di vista della sicurezza è meglio connettere entrambi i terminali degli schermi a terra a causa di possibili tensioni indotte pericolose
- la frequenza di rete a 50 Hz è migliore rispetto quella a 60 Hz, grazie a tensioni e correnti inferiori negli schermi

### 2.3.2 Armoniche

L'effetto delle armoniche sull'entità della tensione indotta nello schermo metallico dei cavi è un fenomeno poco documentato in letteratura. Tuttavia, è generalmente proporzionale al contenuto armonico della corrente di rete.

La presenza di alte armoniche causa vari fenomeni come effetto pelle, loop di ritorno a terra di correnti, effetti capacitivi ed effetti di riflessione delle onde. Tutto ciò influenza le prestazioni dello schermo e può causarne un surriscaldamento.

Vengono adesso presentati e commentati degli studi effettuati dal Gruppo di Ricerca dei Sistemi Elettrici dell'Università Industriale di Santander.[15]

#### Variazione della lunghezza, tensione di esercizio e diametro del conduttore

Si considerano tre conduttori unipolari in XLPE disposti a trifoglio, schermi messi a terra solo ai terminali di partenza e lasciati scollegati ai terminali di arrivo.

Fattore di carico dei cavi pari a 0,8. Resistività del terreno 100  $\Omega \cdot m$ .

Armoniche di 3, 5, 7 e 9 ordine, con ampiezze per unità rispettivamente pari a: 0,01 - 0,008 - 0,005 - 0,001.

I risultati della tensione indotta sugli schermi del conduttore sono indicati nella tabella 2.4. E' evidente come la lunghezza del conduttore e delle tensioni influiscano sui valori ottenuti. In pressoché tutti i casi la tensione indotta sullo schermo metallico ha superato i 25 V.

**Tabella 2.4:** Valore della tensione indotta [V] nella schermatura metallica di un cavo XLPE in funzione della tensione di esercizio, sezione, tensione isolamento del cavo e lunghezza. In presenza di armoniche. Schermi collegati a terra solo ai terminali di partenza - *O.Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»*[15]

Tensione esercizio, Sezione, Tensione isolamento	Lunghezza cavo [km]			
	1	2	3	5
13,2 kV (35 mm <sup>2</sup> @ 15 kV)	17	52	46	124
13,2 kV (50 mm <sup>2</sup> @ 15 kV)	22	68	59	165
13,2 kV (70 mm <sup>2</sup> @ 15 kV)	26	79	68	196
34,5 kV (50 mm <sup>2</sup> @ 35 kV)	25	80	65	232
34,5 kV (70 mm <sup>2</sup> @ 35 kV)	30	86	81	283

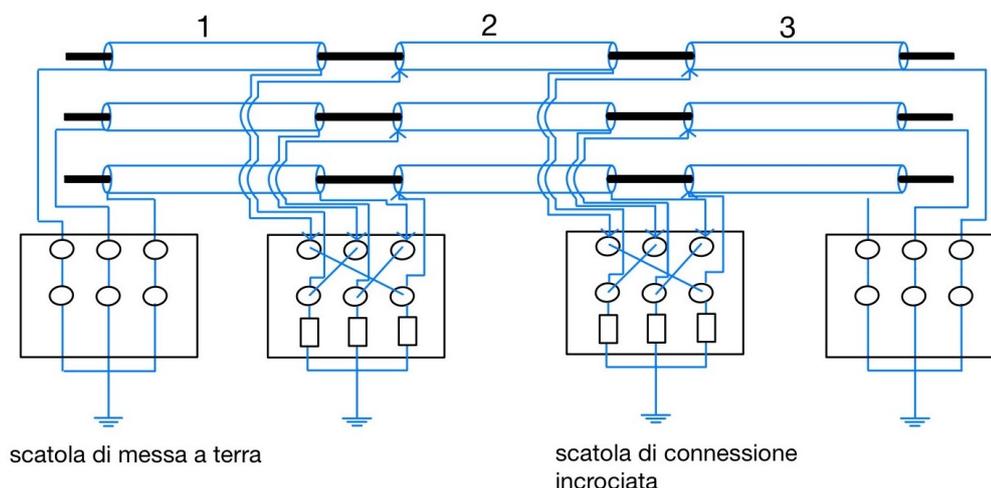
**Cavo XLPE 50 mm<sup>2</sup> da 35 kV considerando variazione nel numero di trasposizioni degli schermi e nel contenuto armonico**

Si considerano sempre tre conduttori unipolari in XLPE disposti a trifoglio, schermi messi a terra solo ai terminali di partenza e lasciati scollegati ai terminali di arrivo. La tensione di esercizio è pari a 34,5 kV. La lunghezza della linea è di 1 km. Fattore di carico dei cavi pari a 0,80. Resistività del terreno 100 Ω·m.

Osservando la tabella 2.5 si può concludere che l'aumento del numero di trasposizioni degli schermi dei cavi consente di ridurre la tensione indotta. La presenza di armoniche, invece, ne aumenta i valori.

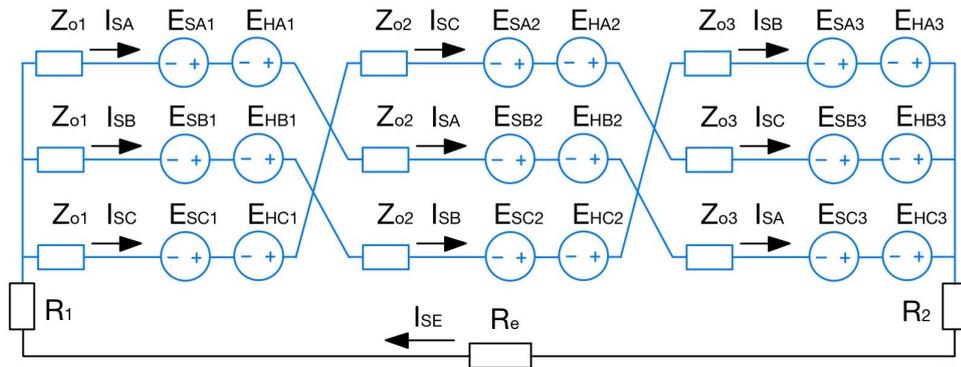
**Tabella 2.5:** Tensione indotta [V] nello schermo metallico di un cavo in XLPE da 50 mm<sup>2</sup> da 35 kV, in funzione del numero di trasposizioni degli schermi e della presenza di armoniche - *O. Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»*[15]

Trasp.	No Armoniche	Armoniche [3,5,7,9]	Armoniche [3,5,7,9]
		(0,01 0,008 0,005 0,001)	(0,02 0,015 0,01 0,005)
1	11	31	78
2	8	25	71
3	6	31	77
4	5	28	73



**Figura 2.18:** Trasposizione degli schermi dei cavi

Nel processo di trasposizione è facile commettere errori, ad esempio effettuando i collegamenti al contrario oppure sbagliati. Inoltre, situazioni come umidità, infiltrazione di acqua, danni dovuti a forze esterne possono causare guasti all'interno delle scatole di trasposizione.



**Figura 2.19:** Circuito equivalente trasposizione degli schermi dei cavi

$Z_{oi}$  : impedenza di schermo della sezione  $i$ -esima

$I_{SA}$  : corrente di schermo della fase A

$I_{SB}$  : corrente di schermo della fase B

$I_{SC}$  : corrente di schermo della fase C

$I_{SE}$  : corrente di dispersione a terra

$E_{SAi}$  : tensione indotta sullo schermo della fase A della sezione  $i$ -esima a causa della corrente di fase

$E_{HAi}$  : tensione indotta sullo schermo della fase A della sezione  $i$ -esima a causa della corrente  $I_{SA}$

$R_1$  ,  $R_2$  : valori misurati di resistenza ai terminali estremi

$R_e$  : resistenza di chiusura del circuito di terra

Come si può vedere in figura 2.18, gli schermi vengono messi direttamente a terra alle estremità di partenza e arrivo, mentre tra le tre tratte adiacenti gli schermi sono isolati da terra e uniti fra loro con collegamento incrociato nelle apposite scatole. Il circuito elettrico equivalente di queste connessioni è illustrato in figura 2.19.

**Cavo XLPE 50 mm<sup>2</sup> da 35 kV considerando diversi fattori di carico dei cavi e variando il contenuto armonico**

Anche per questo caso si considerano tre conduttori unipolari in XLPE disposti a trifoglio, schermi messi a terra solo ai terminali di partenza e lasciati scollegati ai terminali di arrivo.

La tensione di esercizio è pari a 34,5 kV. La lunghezza della linea è di 1 km. Resistività del terreno 100 Ω·m.

**Tabella 2.6:** Tensione indotta [V] nello schermo di un cavo XLPE da 50 mm<sup>2</sup>, in presenza di armoniche e variazione del fattore di carico - *O. Quiroga et al., «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures»*[15]

Carico	No Armoniche	Armoniche [3,5,7,9]	Armoniche [3,5,7,9]
		(0,01 0,008 0,005 0,001)	(0,02 0,015 0,01 0,005)
50%	5	16	45
80%	8	25	71
100%	9	31	88

Si può concludere che, aumentando il fattore di carico dei conduttori, la tensione indotta negli schermi aumenta. La presenza di armoniche nella rete incrementa ancora di più i valori.(tabella 2.6)

## 2.4 Perdite della linea MT e temperatura degli schermi

Attraverso l'analisi di studi agli elementi finiti effettuati dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università Tecnica di Babol, si vogliono comprendere gli effetti termici ed elettrici dovuti alla schermatura dei cavi di media tensione.[19]

Le perdite nello schermo ( $\lambda$ ), dal punto di vista analitico, vengono modellizzate tramite lo standard IEC-60287 che definisce due fonti:

- perdite per correnti di circolazione ( $\lambda'_1$ )
- perdite per correnti parassite ( $\lambda''_1$ )

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R_{ac}} \left( 1 + \left( \frac{R_s}{X_m} \right)^2 \right)^{-1} \quad (2.1)$$

$$\lambda''_1 = \frac{3 \cdot 10^{-14} \cdot \omega^2 \cdot d_s}{s 2 R_{ac} R_s} \quad (2.2)$$

$R_s$  : resistenza dello schermo

$R_{ac}$  : resistenza in corrente alternata del conduttore

$X_m$  : mutua reattanza tra schermo e conduttore

$d_s$  : diametro medio dello schermo

$s$  : distanza assiale tra i conduttori

$\omega$  : pulsazione di corrente nel conduttore ( $\omega = 2\pi f$ )

Da notare che solitamente le perdite per correnti parassite vengono ignorate nei calcoli a causa dei valori bassi.

L'utilizzo di FEM è un altro metodo per il calcolo delle perdite che viene utilizzato per sistemi complicati e calcoli precisi. Gli schermi vengono quindi scomposti in piccoli elementi infinitesimi (e).

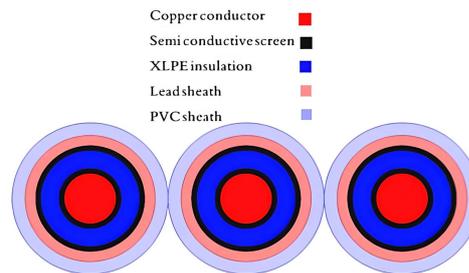
$$P_s = \sum_e \int_s \int_s (J_e(x, y) \cdot J_e^*(x, y) / \sigma_s) dx dy \quad (2.3)$$

$P_s$  : potenza dissipata nello schermo

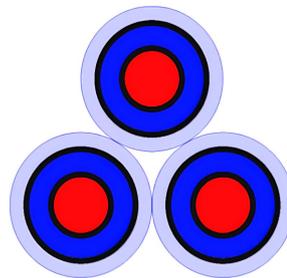
$\sigma_s$  : conduttività dello schermo

$J_e(x, y)$  : densità di corrente nello schermo

Vengono studiate due categorie di cavi di alimentazione interrati. Un tipo è costituito da cavi di media tensione unipolari senza schermi metallici e l'altro tipo è costituito da cavi di media tensione con schermo metallico. L'isolamento e il rivestimento esterno sono rispettivamente in XLPE e PVC. Entrambi i cavi esaminati hanno conduttori in rame con sezione trasversale di  $630 \text{ mm}^2$  e lo spessore dello schermo è di 2 mm. Il diametro esterno dei cavi è rispettivamente di 51 mm e 49,2 mm. I cavi, come si può vedere in figura 2.20 e 2.21, sono considerati sia in configurazione piatta che a trifoglio. Un sistema equilibrato di correnti con valore efficace di 400 A attraversa i conduttori di potenza dei cavi.



**Figura 2.20:** Configurazione piatta cavi adiacenti schermati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]



**Figura 2.21:** Configurazione trifoglio cavi adiacenti non schermati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

In tabella 2.7 sono rappresentati i risultati delle perdite nei conduttori di potenza nel caso di cavi adiacenti, non schermati, in entrambe le configurazioni.

$P_i$  ( $i= a, b, c$ ) indica la perdita di potenza nella fase  $i$ -esima.

I risultati delle perdite calcolate con i due metodi IEC e FEM sono in buon accordo per entrambe le configurazioni. Differenze maggiori però risultano nella configurazione piatta. Inoltre, nei calcoli FEM, le perdite nel conduttore centrale

**Tabella 2.7:** Perdite nei cavi adiacenti non schermati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

Perdite [W/m]	Trifoglio		piatta	
	FEM	IEC	FEM	IEC
$P_a$	5,27	5,27	5,01	5,27
$P_b$	5,27	5,27	5,73	5,27
$P_c$	5,27	5,27	5,07	5,27

sono maggiori rispetto ai conduttori esterni a causa dell'effetto prossimità che risulta essere implementato, a differenza delle formule presenti nella IEC-60287 che non ne tengono conto.

In tabella 2.8 sono mostrati i risultati di calcolo per cavi adiacenti schermati in entrambe le configurazioni. Come si vede, le perdite di potenza per correnti parassite sono molto inferiori rispetto alle altre ed è per questo che si trascurano.

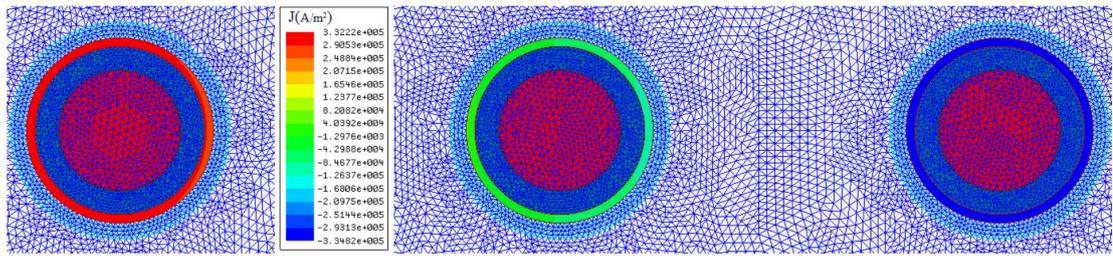
**Tabella 2.8:** Perdite nei cavi adiacenti schermati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

Perdite [W/m]	Trifoglio		Piatta	
	FEM	IEC	FEM	IEC
$P_a$	5,22	5,23	4,99	5,23
$P_b$	5,22	5,23	5,65	5,23
$P_c$	5,22	5,23	5,05	5,23
$P_{sa,e}$	0,08	0,09	0,04	0,05
$P_{sb,e}$	0,08	0,09	0,15	0,17
$P_{sc,e}$	0,08	0,09	0,05	0,05
$P_{sa,c}$	0,65	0,62	1,66	1,57
$P_{sb,c}$	0,65	0,62	0,63	0,54
$P_{sc,c}$	0,65	0,62	1,16	1,38

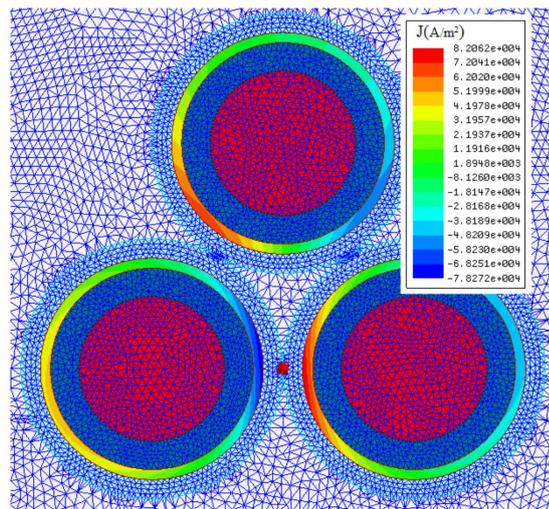
$P_i$  (i= a,b, c) perdite di potenza nei conduttori

$P_{si,e}$  (i= a,b, c) perdite di potenza negli schermi dovute alle correnti parassite

$P_{si,c}$  (i= a,b, c) perdite di potenza negli schermi dovute alle correnti di circolazione



**Figura 2.22:** Analisi FEM densità di corrente schermi, configurazione piatta, cavi distanziati schermati - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»*[19]



**Figura 2.23:** Analisi FEM densità di corrente schermi, configurazione trifoglio, cavi adiacenti schermati - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»*[19]

In tabella 2.9 sono rappresentati i risultati delle potenze dissipate nei conduttori nel caso di cavi non schermati e distanziati di una quantità pari al diametro esterno del cavo.

**Tabella 2.9:** Perdite nei cavi non schermati distanziati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

Perdite [W/m]	Trifoglio		Piatta	
	FEM	IEC	FEM	IEC
$P_a$	4,91	4,90	4,80	4,90
$P_b$	4,91	4,90	5,00	4,90
$P_c$	4,91	4,90	4,80	4,90

In tabella 2.10 sono rappresentati i risultati delle potenze dissipate nei conduttori e negli schermi nel caso di cavi schermati e distanziati di una quantità pari al diametro esterno del cavo.

**Tabella 2.10:** Perdite nei cavi schermati distanziati - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

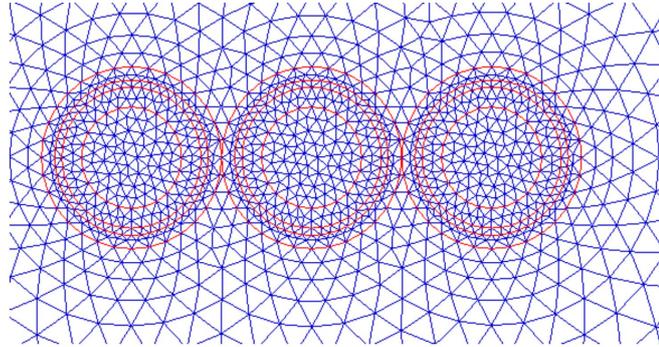
Perdite [W/m]	Trifoglio		Piatta	
	FEM	IEC	FEM	IEC
$P_a$	4,91	4,90	4,80	4,90
$P_b$	4,91	4,90	5,00	4,90
$P_c$	4,91	4,90	4,80	4,90
$P_{sa,e}$	0,02	0,02	0,01	0,01
$P_{sb,e}$	0,02	0,02	0,03	0,05
$P_{sc,e}$	0,02	0,02	0,01	0,01
$P_{sa,c}$	1,91	1,92	3,53	3,42
$P_{sb,c}$	1,91	1,92	1,75	1,41
$P_{sc,c}$	1,91	1,92	2,66	3,03

Le considerazioni che si possono trarre dall'analisi elettrica agli elementi finiti sono:

- nel caso di cavi distanziati, le perdite dei conduttori di potenza in entrambe le configurazioni (trifoglio e piatta) risultano uguali sia per cavi schermati che non schermati. Inoltre, risultano inferiori al caso dei conduttori adiacenti. Tutto ciò grazie al minor effetto di prossimità dei cavi.
- nel caso di cavi distanziati, si verifica un aumento considerevole (circa 3 volte) delle perdite dovute alla circolazione di corrente negli schermi, che risultano persino paragonabili a quelle dei conduttori.
- nel caso di cavi adiacenti le perdite di potenza per correnti parassite risultano circa 4 volte più alte rispetto al caso di cavi distanziati. Questo è dovuto al maggior effetto dei campi magnetici generati dai conduttori di potenza.
- le perdite totali della linea sono maggiori nel caso di cavi distanziati e schermati.  
Risultano circa il 15% più alte rispetto al caso di cavi adiacenti schermati.  
Risultano circa il 30% più alte rispetto al caso di cavi adiacenti non schermati.

Queste percentuali possono sembrare molto più alte di quello che ci si potrebbe aspettare, ma questo è dovuto alla corrente utilizzata (400 A) che risulta inferiore alla portata del cavo interrato (780 A), quindi le perdite nel conduttore di potenza non risultano così preponderanti.

Tramite il metodo agli elementi finiti, viene approfondita anche l'analisi termica di diversi casi per confrontare l'aumento di temperatura dei cavi a causa delle potenze dissipate nei conduttori e negli schermi. Il FEM, a differenza del calcolo in parallelo svolto con le norme IEC-60827, è in grado di tenere conto anche degli effetti di mutuo riscaldamento, con maggiore precisione dei risultati ottenuti.



**Figura 2.24:** Mesh degli elementi finiti per l'analisi termica - *M.Rasoulpoor et al.*, «*Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method*»[19]

La condizione di interramento dei cavi di media tensione implica che il trasferimento di calore avvenga quasi totalmente per conduzione.

Il bilancio energetico delle potenze dissipate si può scrivere come:

$$W_1 + W_2 = W_o + \Delta W \quad (2.4)$$

dove:

$W_1$  : energia entrante nel cavo da altre fonti (ad esempio altri cavi)

$W_2$  : energia dovuta alle perdite interne nel cavo

$W_o$  : energia immagazzinata nel cavo

$\Delta W$  : dissipazione dell'energia dal cavo

L'equazione per la dissipazione del calore nei cavi interrati è:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = -q \quad (2.5)$$

dove:

$\theta$  : temperatura locale

$\rho$  : resistività termica

$q$  : tasso di trasferimento del calore

Le condizioni al contorno sono espresse dalle seguenti equazioni:

$$T = T(x, y)|_{\tau} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial n} |_{\tau} + q = 0 \quad (2.7)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial n} |_{\tau} = h(T - T_a)|_{\tau} \quad (2.8)$$

dove:

$T$  : temperatura superficiale del cavo

$q$  : tasso di trasferimento del calore

$\rho$  : resistività termica

$T_a$  : temperatura ambiente

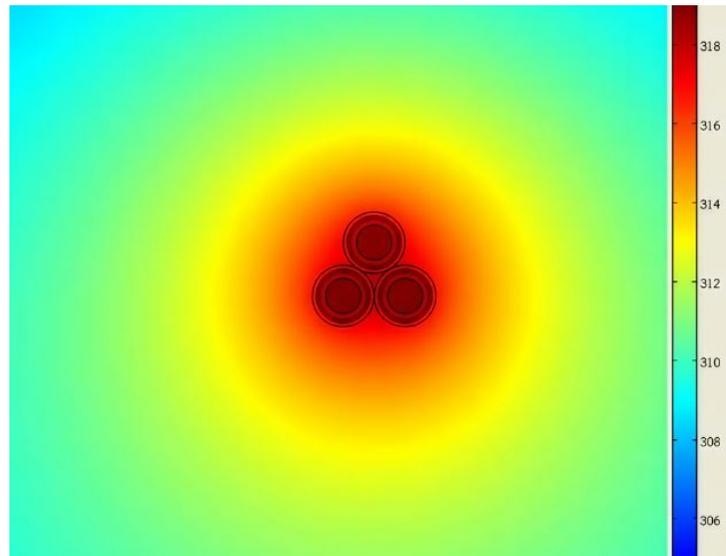
$h$  : coefficiente di scambio termico

$n$  : rappresenta la direzione normale al contorno

$\tau$  : regione di confine

Le simulazioni termiche sono state effettuate considerando la temperatura del terreno pari a 30°C e la temperatura superficiale del terreno a contatto con l'aria pari a 20°C. I cavi risultano posati ad una profondità di 0,8 m e la resistività termica del terreno è pari a 1,5 Km/W. Le perdite dielettriche dei cavi sono considerate trascurabili.

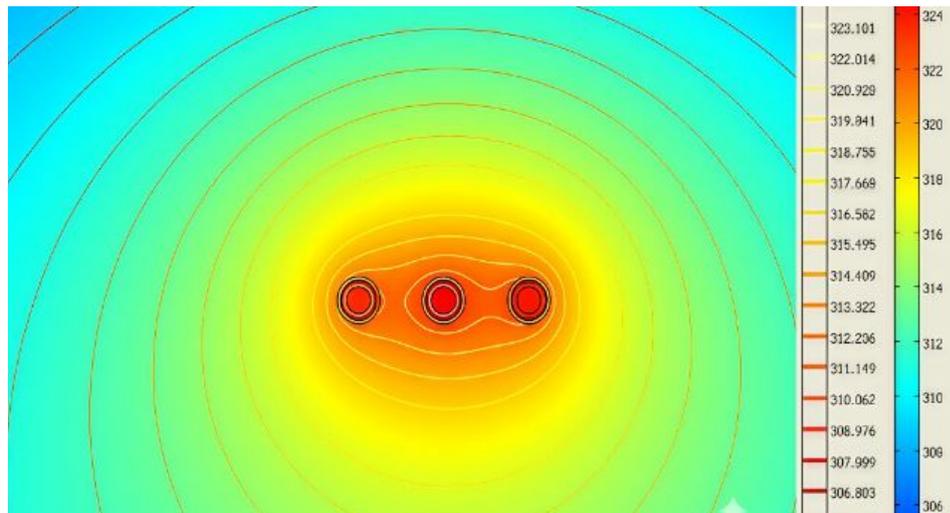
Nelle tabelle 2.11 e 2.12, i risultati delle simulazioni effettuate rispettivamente nelle figure 2.25 e 2.26.



**Figura 2.25:** Analisi termica FEM configurazione trifoglio cavi adiacenti schermati - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»*[19]

**Tabella 2.11:** Temperature massime dei cavi adiacenti in diverse configurazioni - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»*[19]

Configurazione	Cavo non schermato	Cavo schermato
Trifoglio	47,0°C	48,0°C
Piatta	47,1°C	50,0°C



**Figura 2.26:** Analisi termica FEM configurazione piatta cavi distanziati schermati  
 - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»[19]*

**Tabella 2.12:** Temperature massime dei cavi distanziati in diverse configurazioni  
 - *M.Rasoulpoor et al., «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method»[19]*

Configurazione	Cavo non schermato	Cavo schermato
Trifoglio	44,0°C	49,0°C
Piatta	43,5°C	51,7°C

Le considerazioni che si possono trarre dall'analisi termica agli elementi finiti sono:

- le temperature dei cavi risultano inferiori quando non è presente la schermatura in quanto non vi sono le perdite di circolazione di corrente negli schermi
- l'incremento di temperatura di un cavo schermato tuttavia è solo di qualche grado in più, il che risulta contro intuitivo ma questo è dovuto al fatto che le perdite nel conduttore risultano più alte quando il cavo non è schermato e quindi si verifica un fenomeno di bilanciamento
- la configurazione a trifoglio si dimostra nuovamente migliore di quella piatta perché gli incrementi di temperatura, tra presenza o meno di schermatura, risultano inferiori; sia nel caso distanziati che adiacenti
- in tutti i casi la temperatura del cavo risulta sempre inferiore ai 90°C e quindi non ci sono problemi per l'isolante; questo è dovuto alla corrente utilizzata (400 A) che risulta inferiore alla portata del cavo interrato (780 A)
- la temperatura dei cavi aumenta con l'aumentare delle distanze tra cavi, in quanto le perdite dovute alle correnti circolanti negli schermi sono maggiori

## Capitolo 3

# Caratterizzazione sperimentale della corrente circolante negli schermi dei cavi MT

In questo capitolo, vengono presentati i risultati ottenuti dalla collaborazione con l'operatore di distribuzione IRETI attraverso attività di misure sperimentali a Torino. Obiettivo di queste misure è caratterizzare la corrente circolante negli schermi dei cavi in condizioni di normale esercizio, conoscere la resistenza longitudinale degli schermi dei cavi MT, e conoscere la tensione tra l'impianto di terra in prova e lo schermo del cavo quando questi sono mantenuti separati.

### 3.1 Prima attività di misure sperimentali - sottostazione Arbarello

La prima campagna di misure si è svolta presso la sottostazione Arbarello. In questa sottostazione, come in tutte le altre sottostazioni di Torino, gli schermi dei cavi di media tensione risultano collegati all'impianto di terra.

All'interno del locale quadri media tensione (figura 3.1) si è deciso di prendere in esame la linea Denina. Quindi si è proceduti ad aprirne lo scomparto (figura 3.3) per poter collegare gli strumenti di misura ed effettuare le varie prove.

La linea in questione è una dorsale in media tensione a 22 kV, composta da tre cavi unipolari schermati 185 mm<sup>2</sup> 18/30 kV in XLPE, lunga circa 2,2 km e con la presenza di 13 giunti. Durante tutte le prove viene mantenuta in fuori servizio.

**Tabella 3.1:** Caratteristiche schermi cavi MT

<b>Materiale</b>	Rame
<b>Sezione</b>	35 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza</b>	0,51 Ω/km



**Figura 3.1:** Quadri MT stazione Arbarello

### 3.1.1 Misura della corrente negli schermi

La linea risulta essere sezionata e messa a terra alle estremità. Gli schermi dei cavi delle tre fasi risultano essere collegati a stella e messi a terra sia dal lato della cabina primaria che dal lato della cabina secondaria. Schema della prova in figura 3.2.

Utilizzando la pinza amperometrica si misura la corrente totale istantanea che circola negli schermi dei cavi MT in condizioni di fuori servizio.

$$I_{AC_{TOT}} = 200 \text{ mA}$$

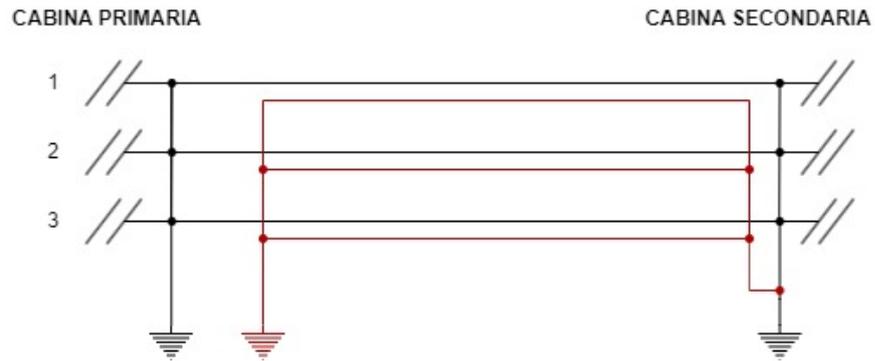
$$I_{DC_{TOT}} = 0 \text{ mA}$$

Successivamente si procede a misurare, sempre in modalità AC, la corrente circolante nello schermo di ogni singola fase:

$$I_{AC_1} = 80 \text{ mA}$$

$$I_{AC_2} = 70 \text{ mA}$$

$$I_{AC_3} = 70 \text{ mA}$$



**Figura 3.2:** Schema prima prova

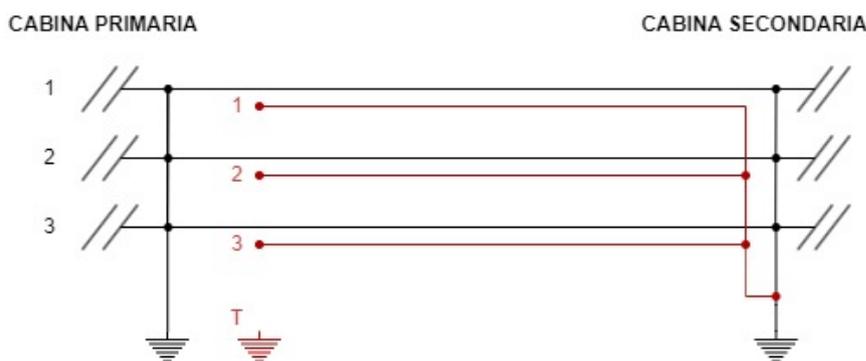


**Figura 3.3:** Vista posteriore dello scomparto linea Denina

### 3.1.2 Misura della resistenza degli schermi

La linea risulta essere sezionata e messa a terra alle estremità, ma a differenza della prova precedente si esclude il collegamento a terra dei tre schermi delle fasi dal lato della cabina primaria. Scherma della prova in figura 3.4.

Inoltre, adesso gli schermi non risultano più essere collegati a stella, ma ogni terminale è lasciato libero per poter misurare la resistenza del circuito equivalente tra due schermi.



**Figura 3.4:** Schema seconda prova

Si posiziona il micro-ohmmetro MOM600A, che però viene utilizzato come generatore di corrente DC tra i terminali degli schermi di due fasi, in quanto la sua portata risulta essere di 1,9 mΩ, ben inferiore ai valori di resistenza che ci si aspetta dal circuito equivalente.

Misurando i valori di tensione e corrente tra i due terminali è possibile calcolare la resistenza equivalente tra gli schermi delle fasi, da cui si ricavano le caratteristiche degli schermi dei cavi MT. (tabella 3.1)

Le misure effettuate:

$$R_{13} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{3,05}{1,30} = 2,35 \Omega$$

$$R_{23} = \frac{3,08}{1,20} = 2,57 \Omega$$

$$R_{12} = \frac{3,20}{1,20} = 2,67 \Omega$$

### 3.1.3 Misura della tensione tra gli schermi dei cavi MT e l'impianto di terra di sottostazione - configurazione 1

La linea risulta essere sezionata e messa a terra alle estremità, rimane escluso il collegamento a terra dei tre schermi delle fasi dal lato della cabina primaria. Lo schema elettrico della prova in figura 3.5 non cambia.

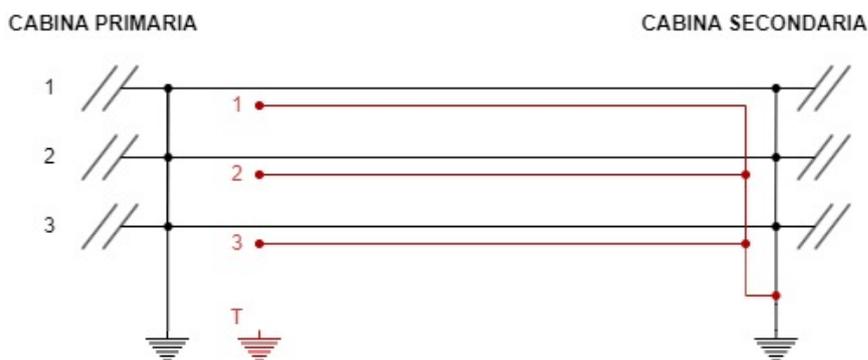


Figura 3.5: Schema terza prova

Adesso si vogliono ricavare le forme d'onda, e misurare le tensioni tra ogni schermo e la messa a terra. Viene utilizzato l'oscilloscopio registratore MR8880-20 della Hioki, di cui vengono sfruttati tre canali analogici, uno per ciascuna tensione. Come illustrato in figura 3.6, è necessario collegare a ciascun input un morsetto al terminale dello schermo della fase e l'altro alla bandella della messa a terra.

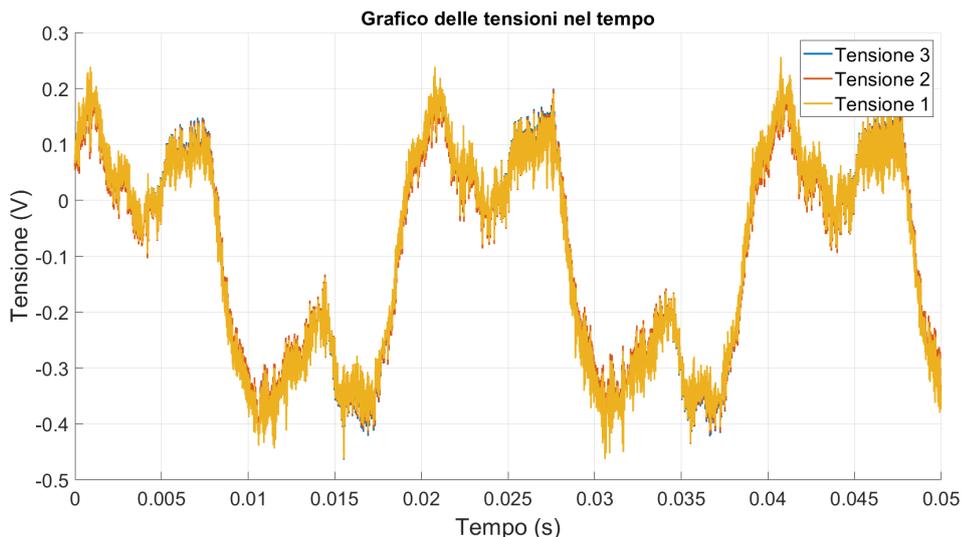


Figura 3.6: Acquisizione delle tensioni sugli schermi

Esempio: 5° acquisizione

Ci si riferisce allo schema elettrico della terza prova con stato di collegamento del neutro compensato.

La sottostante figura 3.7 è solo una porzione dell'intera acquisizione di 2 s.



**Figura 3.7:** Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea da entrambi i lati e neutro compensato

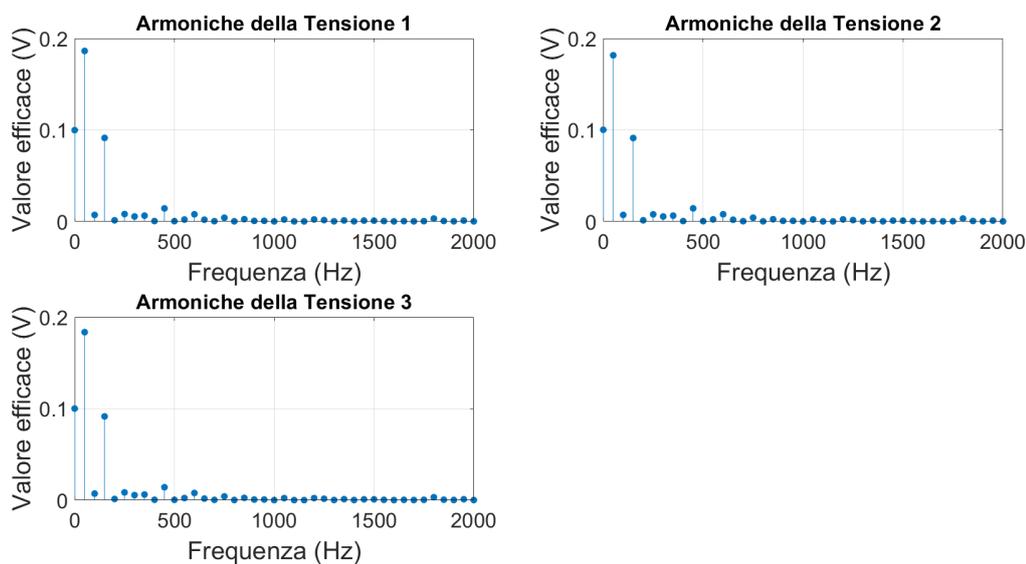
Ampezze picco-picco delle oscillazioni di tensione di circa 0,7 V in cui è possibile notare una componente continua sovrapposta di circa -0,2 V ma non costante durante l'intera durata di acquisizione.

La presenza di una componente continua di tensione negli schermi dei cavi, anche quando non sono messi a terra da entrambi i lati, come nel caso di queste misure (perché bisogna avere i terminali liberi da un lato), può essere attribuita a diversi fattori:

1. Correnti indotte da campi elettromagnetici: campi elettromagnetici variabili come quelli generati da linee elettriche adiacenti, provocano l'indursi di tensioni negli schermi dei cavi che possono manifestarsi come componenti continue a causa di fenomeni di accoppiamento elettromagnetico.
2. Effetti di polarizzazione: i materiali isolanti utilizzati nei cavi possono accumulare cariche nel tempo, soprattutto in presenza di tensioni elevate o condizioni ambientali particolari. Questo può portare a una differenza di potenziale continua rilevabile negli schermi.

3. Influenze esterne: la vicinanza a sorgenti di tensione continua o apparecchiature che operano con componenti continue, come i tram, può causare l'induzione di tensioni negli schermi dei cavi, anche in assenza di una messa a terra su entrambi i lati.

FFT della 5<sup>a</sup> acquisizione fino alla 40<sup>a</sup> armonica (2000 Hz) secondo la IEC61000-4-7:2002.

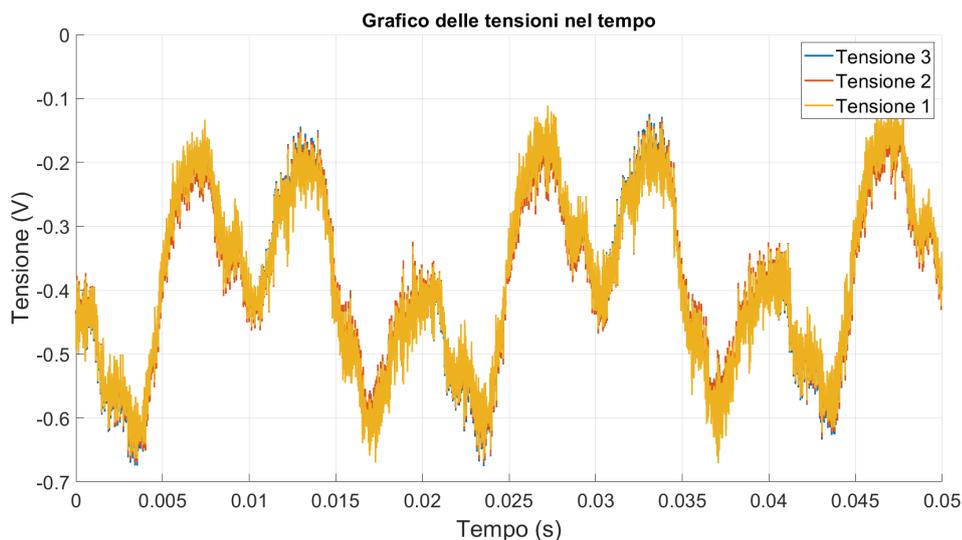


**Figura 3.8:** FFT della 5<sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi

I valori medi delle componenti continue di tensione degli schermi durante l'intera acquisizione di 2 s risultano pari a -0,1 V per tutti e tre gli schermi.

Esempio: 13<sup>a</sup> acquisizione

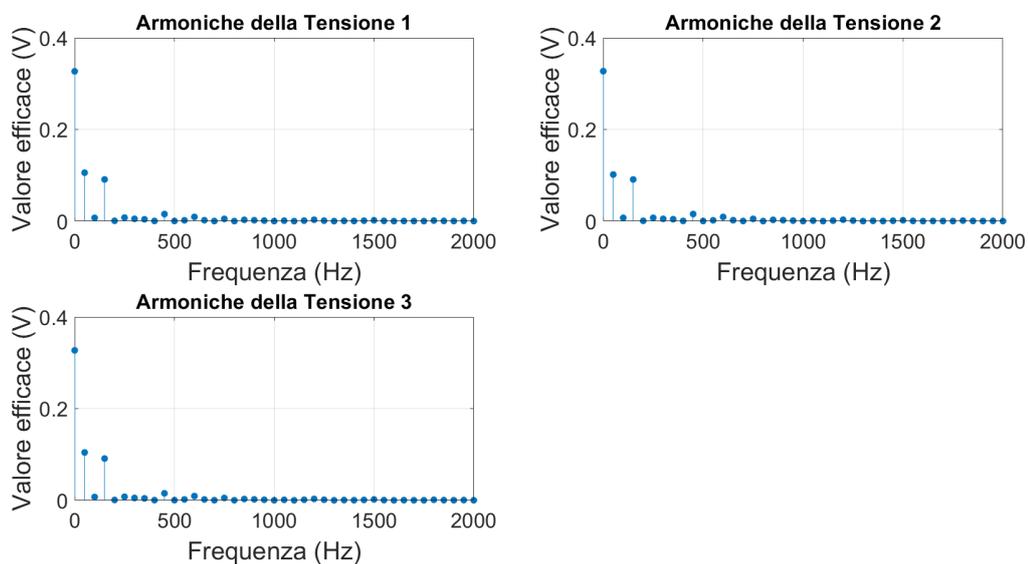
Ci si riferisce sempre allo schema elettrico della terza prova, ma si decide di cambiare lo stato di collegamento del neutro a terra, ovvero si passa dalla configurazione di normale funzionamento a neutro compensato a quella di neutro isolato. La figura 3.9 è solo una porzione dell'intera acquisizione di 2 s.



**Figura 3.9:** Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea da entrambi i lati e neutro isolato

Ampiezze picco-picco delle oscillazioni di tensione di circa 0,6 V in cui è possibile notare una componente continua sovrapposta di circa -0,4 V ma non costante durante l'intera durata di acquisizione, dovuta sempre alla presenza di correnti di dispersione nel terreno, probabilmente generate dal passaggio dei tram nelle vicinanze e dagli altri effetti precedentemente citati.

FFT della 13<sup>a</sup> acquisizione fino alla 40<sup>a</sup> armonica (2000 Hz) secondo la IEC61000-4-7:2002.



**Figura 3.10:** FFT della 13<sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi

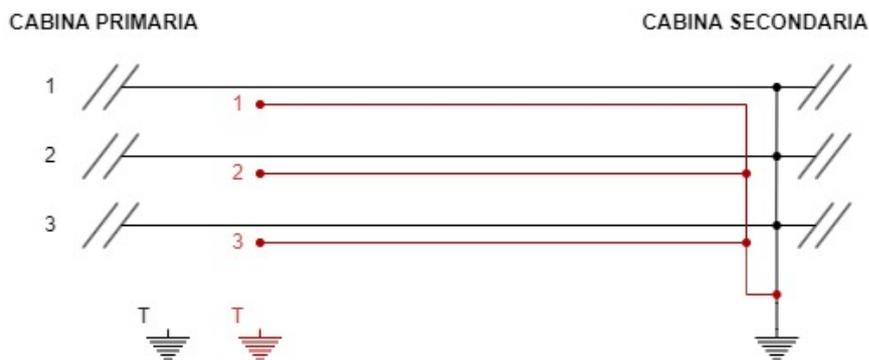
I valori medi delle componenti continue di tensione degli schermi durante l'intera acquisizione di 2 s risultano pari a -0,33 V per tutti e tre gli schermi.

Tra la 5<sup>a</sup> e la 13<sup>a</sup> acquisizione, ci sono differenze sia nella forma dei profili temporali

delle tensioni degli schermi, sia per quanto riguarda il valore efficace della prima armonica (50 Hz) che nella 13<sup>a</sup> acquisizione si dimezza. Tutto ciò è imputabile al passaggio da neutro compensato a neutro isolato.

### 3.1.4 Tensione tra gli schermi dei cavi MT e l'impianto di terra di sottostazione - configurazione 2

La linea risulta essere sezionata alle estremità, ma con la messa a terra delle fasi solo dal lato della cabina secondaria, come mostrato in figura 3.11. Rimane escluso il collegamento a terra dei tre schermi delle fasi dal lato della cabina primaria.



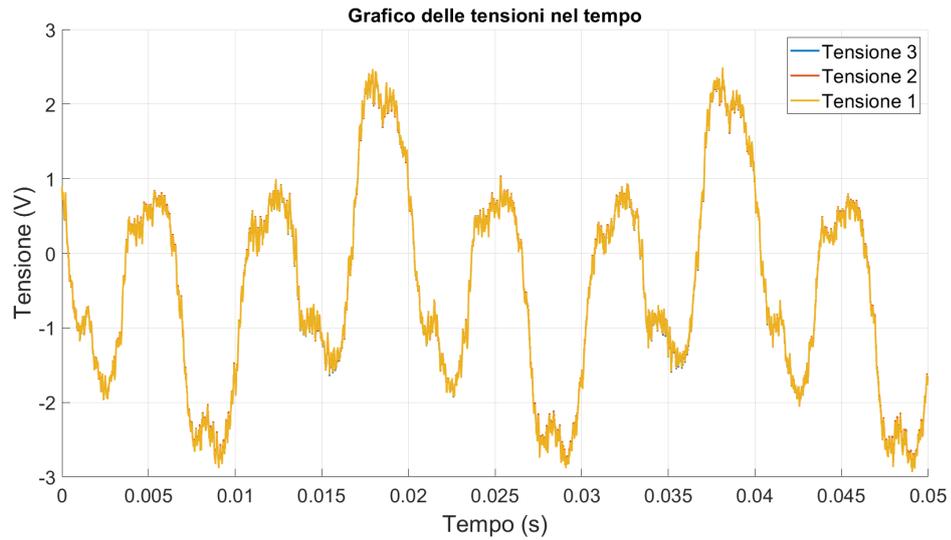
**Figura 3.11:** Schema quarta prova

Si vogliono nuovamente ricavare le forme d'onda e misurare le tensioni tra ogni schermo e la messa a terra.

Esempio: 18<sup>a</sup> acquisizione

Ci si riferisce allo schema elettrico della quarta prova, quindi messa a terra della linea solo dal lato della cabina secondaria. Stato del neutro isolato.

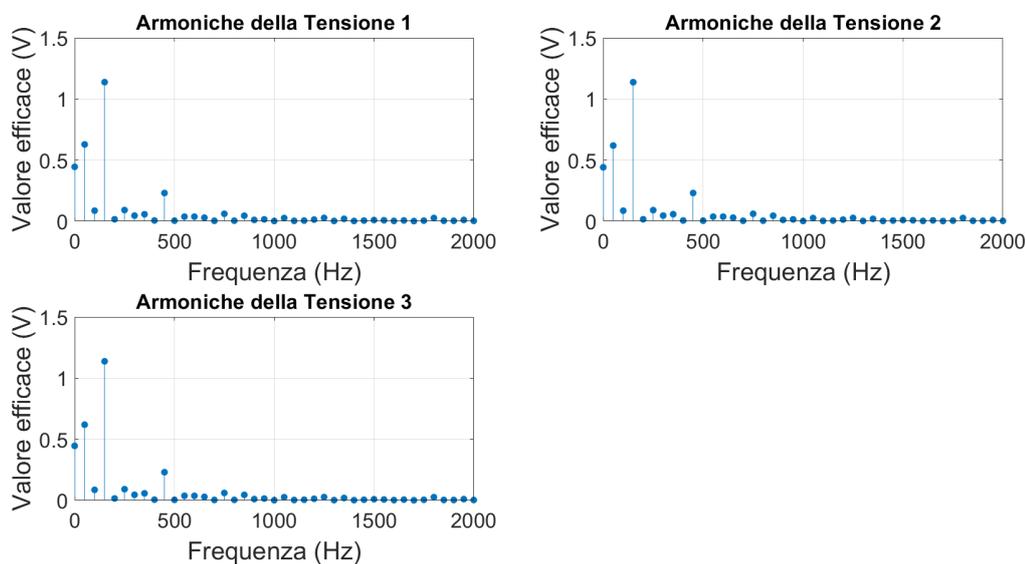
La figura 3.12 è solo una porzione dell'intera acquisizione di 1 s.



**Figura 3.12:** Profili temporali delle tensioni degli schermi dei cavi con messa a terra della linea solo da un lato e neutro isolato

Ampiezze picco-picco delle oscillazioni di tensione risultano molto maggiori e circa pari a 5 V.

FFT della 18<sup>a</sup> acquisizione fino alla 40<sup>a</sup> armonica (2000 Hz) secondo la IEC61000-4-7:2002.



**Figura 3.13:** FFT della 18<sup>a</sup> acquisizione di tensione degli schermi dei cavi

La forma dei profili temporali delle tensioni, in questa nuova condizione di prova, varia ancora.

L'ampiezza di oscillazione di tensione risulta maggiore perché la messa a terra della linea è solo dal lato della cabina secondaria.

La terza armonica (150 Hz) adesso ha valore efficace maggiore di 1,1 V, mentre nei casi precedenti era di circa 0,1 V.

Le armoniche ad alta frequenza sono più attive. Infatti, i valori efficaci delle tensioni delle armoniche prima erano presenti fino a componenti di 800 Hz, dopodiché tutto piatto. Adesso invece si vede la presenza di componenti fino a 1800 Hz.

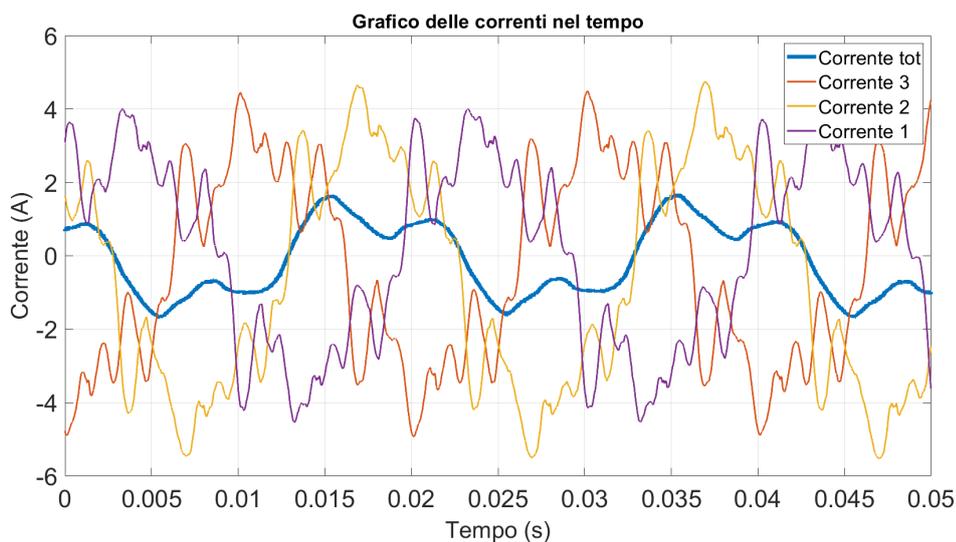
## 3.2 Seconda attività di misure sperimentali

La seconda campagna di misure si è svolta sempre presso la sottostazione Arbarello. L'attività riguardava la misura delle quattro correnti ( fasi 1,2,3 + totale(4) ) degli schermi dei cavi di media tensione della linea Denina.

Le condizioni erano linea in servizio, con messa a terra degli schermi da entrambi i lati e stato di collegamento del neutro compensato.

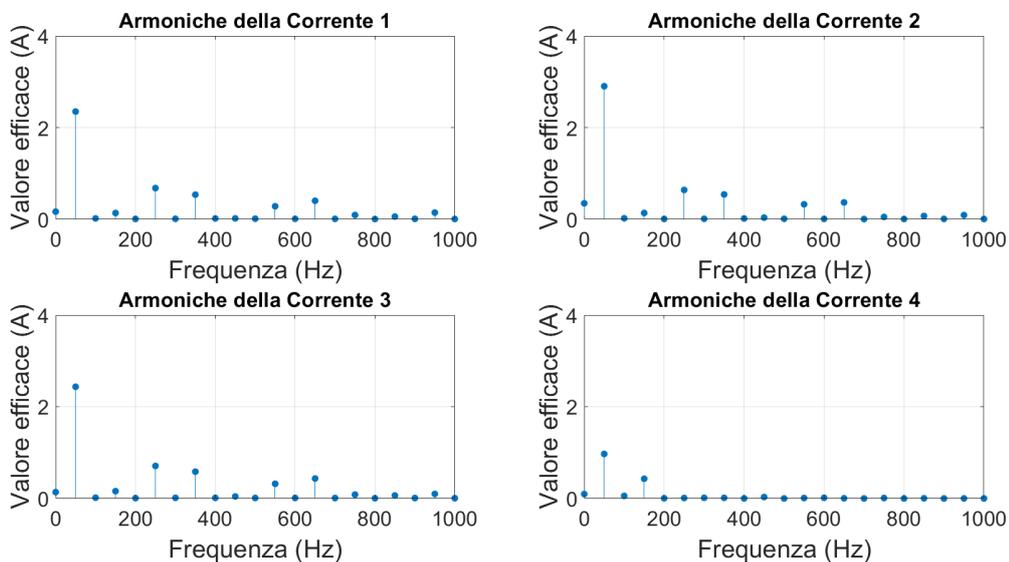
Inoltre, è stata eseguita l'analisi FFT delle 34 acquisizioni, in accordo alla IEC61000-4-7:2002.

La figura 3.14 è una porzione della prima acquisizione di 5 s delle correnti degli schermi dei cavi con la linea in servizio e stato del neutro compensato.



**Figura 3.14:** Profili temporali delle correnti negli schermi dei cavi con linea in servizio e neutro compensato

FFT della 1<sup>a</sup> acquisizione fino alla 20<sup>a</sup> armonica (1000 Hz) secondo la IEC61000-4-7:2002



**Figura 3.15:** FFT della 1<sup>a</sup> acquisizione di corrente degli schermi dei cavi

In tutte le misure effettuate in circa 1 h, con tempi di acquisizione variabili tra 1÷50 [s], le correnti non presentano nessuna differenza sostanziale di forma nei vari profili temporali, ovvero tutte le acquisizioni sono molto simili tra loro.

La tabella 3.2 presenta i valori efficaci medi delle armoniche per ciascuna corrente e i valori medi delle componenti continue, prendendo in considerazione tutte le acquisizioni.

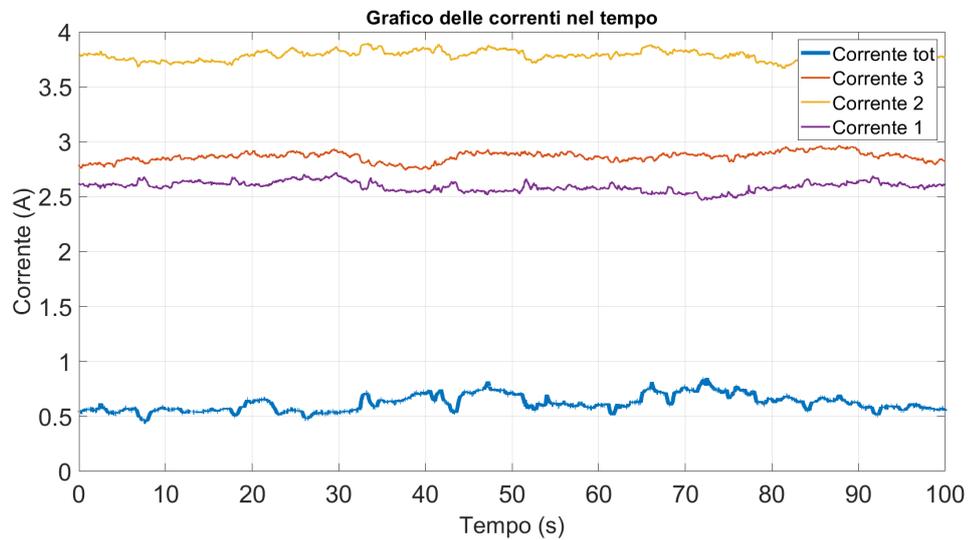
**Tabella 3.2:** Valori efficaci medi [A] delle correnti per ogni armonica

Armonica	Corrente 1	Corrente 2	Corrente 3	Corrente 4
DC	-0,078	-0,302	-0,108	-0,474
1	2,486	2,742	2,482	0,583
2	0,017	0,015	0,015	0,044
3	0,148	0,144	0,158	0,445
4	0,008	0,009	0,008	0,004
5	0,604	0,567	0,644	0,016
6	0,013	0,012	0,014	0,014
7	0,442	0,443	0,497	0,008
8	0,016	0,015	0,013	0,001
9	0,017	0,028	0,039	0,036
10	0,014	0,012	0,011	0,001
11	0,249	0,274	0,268	0,008
12	0,011	0,010	0,009	0,016
13	0,326	0,289	0,369	0,003
14	0,009	0,007	0,008	0,001
15	0,095	0,046	0,086	0,010
16	0,007	0,009	0,006	0,001
17	0,052	0,058	0,052	0,003
18	0,010	0,009	0,008	0,001
19	0,160	0,098	0,105	0,002
20	0,007	0,007	0,006	0,001

I valori negativi delle componenti continue, sulla base di come sono state posizionate le pinze amperometriche, significano che le correnti di dispersione presenti nelle vicinanze vanno dalla sottostazione alla cabina secondaria della linea Denina. Queste molto probabilmente sono dovute alla circolazione di motrici tranviarie nei pressi della sottostazione.

L'ultima acquisizione (35<sup>a</sup>) prevedeva solo la misura dei valori efficaci di corrente.

La figura 3.16 è una porzione di 100 s su 1000 s della 35<sup>a</sup> acquisizione.



**Figura 3.16:** Profili temporali dei valori efficaci delle correnti negli schermi dei cavi con linea in servizio e neutro compensato

valore efficace medio corrente 1 = 2,6 A

valore efficace medio corrente 2 = 3,9 A

valore efficace medio corrente 3 = 2,8 A

valore efficace medio corrente 4 = 0,7 A

## Capitolo 4

# Effetto di lunghezza e giunti sui guasti

In collaborazione con IRETI, si vuole valutare l'impatto sul numero di guasti di ciascuna linea in partenza dalle sottostazioni AT/MT in relazione alla loro lunghezza e numero di giunti.

Il seguente studio è motivato dall'ipotesi iniziale del distributore in cui si ritiene che le prime tratte, ovvero le porzioni di linea comprese tra le sottostazioni e la prima cabina secondaria, siano maggiormente interessate dai guasti.

### 4.1 Definizione del dataset

La base di partenza dei dati viene fornita dal distributore ed è formata da 3 file Excel:

- Prime tratte rev01
- Guasti MT Torino 2024
- Studio PDS

Il primo file (Prime tratte rev01) contiene i dati delle prime tratte di 191 linee in media tensione di Torino. Con specificata la cabina primaria di partenza, sezione di appartenenza (sbarra MT), nome della linea, lunghezza del primo tratto, numero di giunti, nome della prima cabina secondaria, lunghezza media tra giunti. Si veda tabella 4.1.

**Tabella 4.1:** File Excel - Prime tratte rev01

CP	Sez.	Linea	Lunghezza[m]	n°giunti	Cabina	L.tra giunti[m]
Arbarello	Rossa	Adriano	2567	13	DL34	183
Arbarello	Rossa	Avogadro	190	1	3206	95
Arbarello	Rossa	Bellezia	1029	7	AF62	129
Arbarello	Rossa	Bligny	563	3	AC766	141
Arbarello	Rossa	Egizio	1074	7	3280	134
Arbarello	Rossa	Iolanda	1987	14	AS99	132
Arbarello	Rossa	Parma	1917	7	5191	240
Arbarello	Rossa	Vittorio	191	1	DA26	96
Arbarello	Verde	Bixio	2908	13	DC50	208
Arbarello	Verde	Cosseria	3442	16	AU90	202
Arbarello	Verde	Statuto	1101	6	5719	157
Arbarello	Verde	Traves	355	2	3354	118
Arbarello	Verde	Denina	2187	13	AL68	156
Arbarello	Verde	Reale	130	1	5553	65
Arbarello	Verde	Stige	552	5	3667	92
Centro	Blu	Bodoni	698	7	3757	87
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

Il secondo file (Guasti MT Torino 2024) contiene i dati di tutti i guasti delle linee in media tensione che si sono verificati a Torino durante il 2024. In totale ne sono riportati 502 e per ciascuno di essi viene specificato:

- Data inizio guasto - Data fine guasto
- Ora inizio guasto - Ora fine guasto
- Numero di avviso
- Ordine MINT - Ordine MCOR
- Cabina primaria di riferimento
- Linea
- Protezione intervenuta
- Assetto di rete
- Tratto di linea interessata - Indirizzo punto di guasto
- PdL di Ricerca e PdL di Riparazione
- N° di cabina Antenna
- Impresa esecutrice della riparazione
- Stato attuale della linea
- Note varie

Questo file è stato fondamentale per ricavare il numero di guasti delle sole prime tratte delle linee in media tensione. In quanto veniva esplicitamente riportato il tratto di linea interessato dal guasto. (es. tra CP SUD OVEST e prima cabina secondaria 5257)

Il terzo file (Studio PDS) è stato utilizzato per ricavare:

- il numero totale di guasti afferenti all'intera lunghezza della linea. (n°guasti prima tratta + n°guasti tratta intermedia)

Così, noti il numero di guasti relativi alla prima tratta (dal precedente file) e quelli dell'intera tratta (dalla sottostazione all'ultima cabina secondaria), è possibile avere il numero di guasti della cosiddetta tratta intermedia, ovvero quella dalla prima cabina secondaria all'ultima cabina secondaria.

- la lunghezza dell'intera linea ( L. prima tratta + L. tratta intermedia)

Così, nota la lunghezza della prima tratta ricavata dal primo file e quella dell'intera linea, è possibile ricavare la lunghezza della tratta intermedia.

- il numero di giunti dell'intera linea (n°giunti prima tratta + n°giunti tratta intermedia)

Così, noto il numero di giunti della prima tratta ricavata dal primo file e quella dell'intera linea, è possibile ricavare il numero di giunti della tratta intermedia.

Quindi, a partire da questi 3 file, si crea un foglio Excel, (si veda tabella 4.2) in cui vengono raccolti tutti i dati necessari per lo studio successivo. Esso risulta così formato:

**Tabella 4.2:** Foglio Excel riassuntivo dei principali dati relativi alle tratte: prima, totale e intermedia delle linee in media tensione di Torino

CP	Sez	Linea	L[m] prima	n°giu prima	n°gua prima	L[m] tot	n°giu tot	n°gua tot	L[m] inter	n°giu inter	n°gua inter
Arb	Rossa	Adriano	2567	13	0	5043	45	3	2476	32	3
Arb	Rossa	Avogadro	190	1	0	3751	28	1	3561	27	1
Arb	Rossa	Bellezia	1029	7	2	4307	59	5	3278	52	3
Arb	Rossa	Bligny	563	3	0	7334	67	1	6711	64	1
Arb	Rossa	Egizio	1074	7	2	3961	39	3	2887	32	1
Arb	Rossa	Iolanda	1987	14	0	13376	105	0	11389	91	0
Arb	Rossa	Parma	1917	7	2	4184	46	4	2267	39	2
Arb	Rossa	Vittorio	191	1	0	7293	55	1	7102	54	1
Arb	Verde	Bixio	2908	13	0	11347	93	7	8439	80	7
Arb	Verde	Cosseria	3442	16	0	34692	156	4	31250	140	4
Arb	Verde	Statuto	1101	6	0	11431	112	4	10330	106	4
Arb	Verde	Traves	355	2	0	3427	12	1	3072	10	1
Arb	Verde	Denina	2187	13	0	5122	47	1	2935	34	1
Arb	Verde	Reale	130	1	0	2793	37	2	2663	36	2
Arb	Verde	Stige	552	5	0	3005	49	1	2453	44	1
Cen	Blu	Bodoni	698	7	0	4209	57	0	3511	50	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

## 4.2 Analisi dei dati

Definito il dataset, adesso è possibile procedere all'analisi dei guasti delle linee, in relazione alla loro lunghezza e al numero di giunti.

### 4.2.1 Scatter plot

Al fine di comprendere le principali variabili che influenzano il numero di guasti registrati lungo le tratte, sono stati realizzati tre scatter plot che mettono in relazione i guasti con tre parametri distinti: la lunghezza della tratta, il numero di giunti e il rapporto tra giunti e lunghezza.

- asse X = lunghezza della linea  
asse Y = numero di guasti
- asse X = numero di giunti  
asse Y = numero di guasti
- asse X = numero di giunti/lunghezza tratta  
asse Y = numero di guasti

In cui:

- colore rosso = tratta prima  
(dalla sottostazione AT/MT alla prima cabina secondaria)
- colore nero = tratta intermedia  
(dalla prima cabina secondaria all'ultima cabina secondaria)

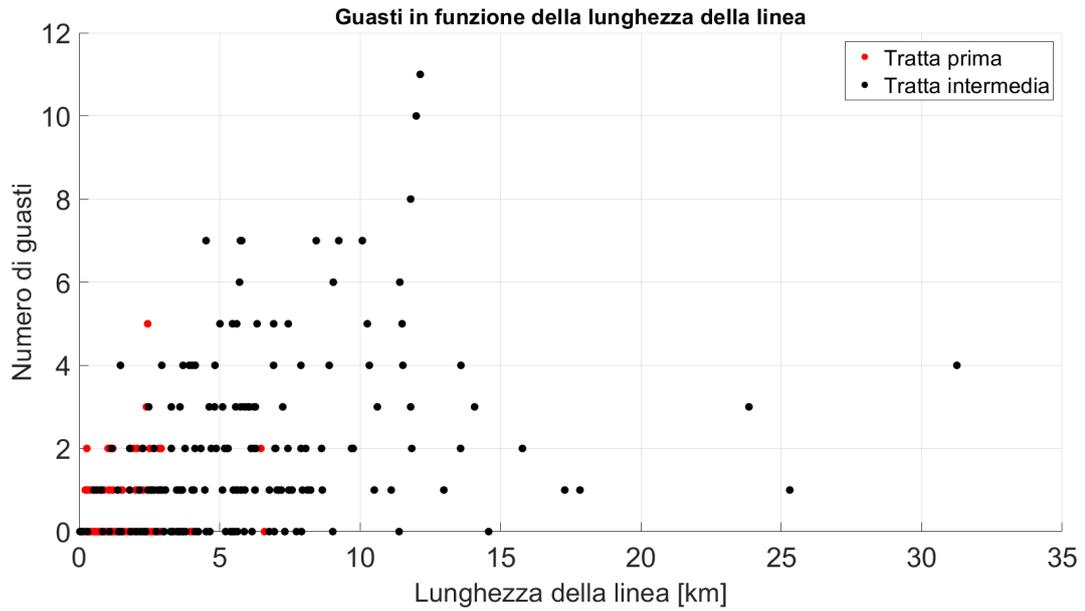


Figura 4.1: Scatter plot 1 - Guasti in funzione della lunghezza della linea

### Guasti in funzione della lunghezza della linea

Il primo grafico in figura 4.1 mostra che c'è una leggera correlazione tra il numero di guasti e la lunghezza della linea. Al crescere della lunghezza della linea aumenta la probabilità di avere un numero elevato di guasti. Tuttavia, molti guasti si presentano anche su tratte brevi.

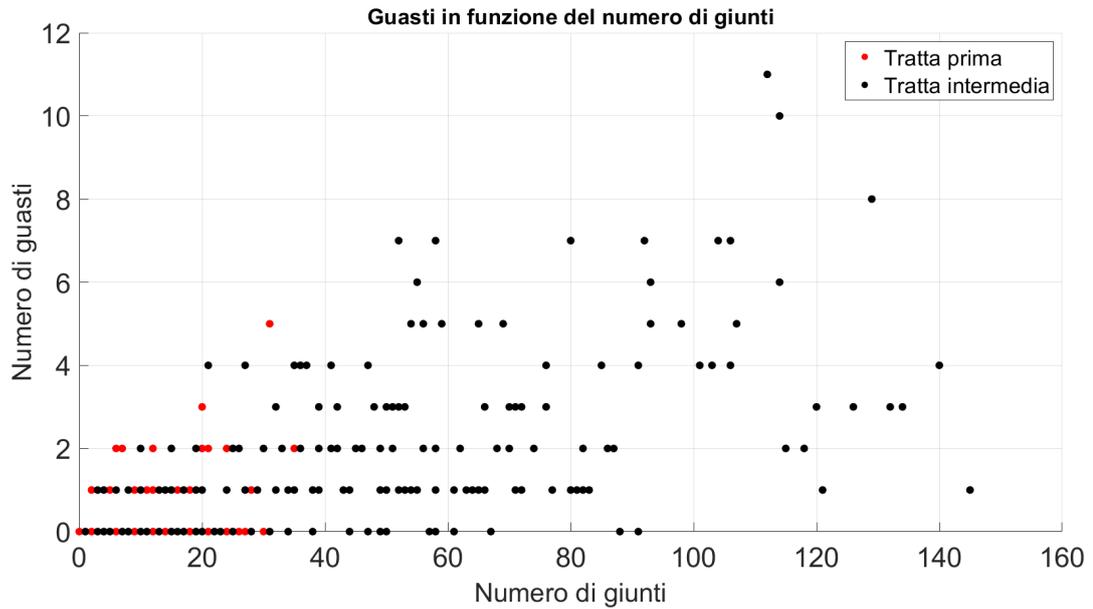


Figura 4.2: Scatter plot 2 - Guasti in funzione del numero di giunti

### Guasti in funzione del numero di giunti

Nel secondo grafico in figura 4.2, si osserva una tendenza più chiara: al crescere del numero di giunti, aumenta anche la probabilità di guasti. Questa relazione è compatibile con l'ipotesi che i giunti costituiscano un punto debole all'interno dell'infrastruttura. Le tratte con più di 80 giunti mostrano un incremento evidente dei guasti. Anche in questo caso, le tratte "intermedie" mostrano maggiore densità di guasti rispetto a quelle "prima", ma la tendenza è simile in entrambe.

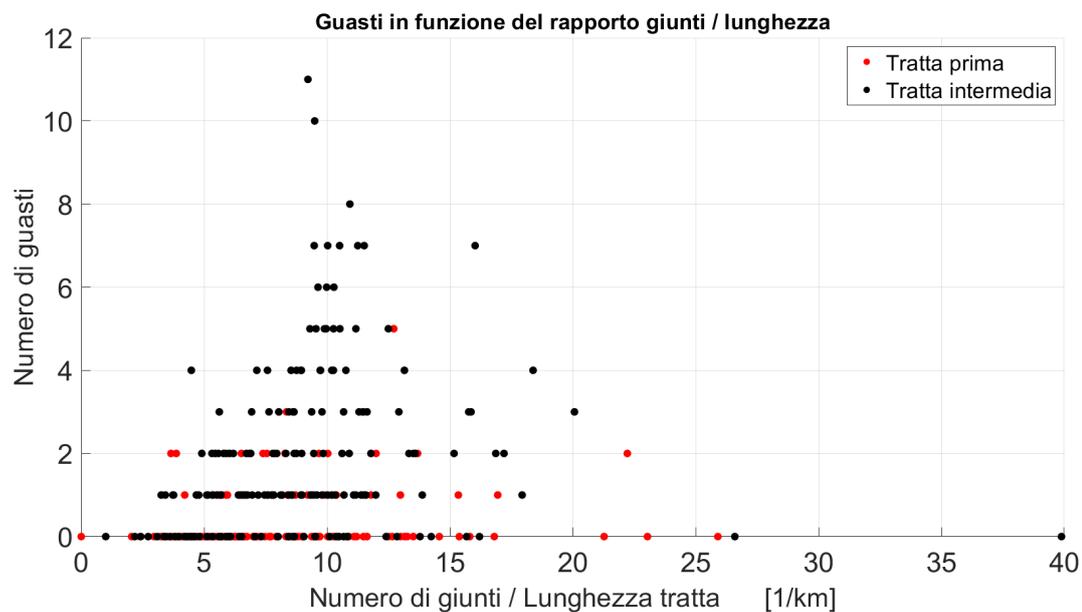


Figura 4.3: Scatter plot 3 - Guasti in funzione del rapporto giunti/lunghezza

### Guasti in funzione del rapporto giunti/lunghezza

Il terzo grafico in figura 4.3, mette in relazione il numero di guasti con la densità di giunti, espressa come rapporto tra il numero di giunti e la lunghezza della tratta (in km). Questa normalizzazione ha permesso di scorporare i due parametri presi in considerazione (numero di giunti e lunghezza della tratta). Qui la correlazione appare ancora più marcata: al crescere del rapporto, aumenta la probabilità di guasti.

## 4.2.2 Bubble plot

I grafici a bolle sono utili perché rappresentano una visualizzazione efficace della relazione tra la lunghezza delle linee e il numero di guasti registrati in diverse cabine primarie. La dimensione di ciascuna bolla è proporzionale al numero di guasti, permettendo una rapida identificazione delle criticità e delle tendenze nei diversi impianti.

Vengono quindi realizzati degli script per la creazione di tre varianti di grafici:

- un grafico per cabina primaria  
asse X = lunghezza della linea  
asse Y = numero di giunti  
dimensione bolla = numero di guasti  
colore del bordo = (rosso se prima tratta, nero se altre tratte)  
colore della bolla = trasparente
- un grafico con i dati di tutte le cabine  
asse X = lunghezza della linea  
asse Y = numero di giunti  
dimensione bolla = numero di guasti  
colore del bordo = (rosso se prima tratta, nero se altre tratte)  
colore della bolla = trasparente
- un grafico con i dati di tutte le cabine  
asse X = lunghezza della linea  
asse Y = numero di giunti  
dimensione bolla = numero di guasti  
colore del bordo = (rosso se prima tratta, nero se altre tratte)  
colore della bolla = codice colore della cabina primaria

In cui:

- colore rosso = tratta prima  
(dalla sottostazione AT/MT alla prima cabina secondaria)
- colore nero = tratta intermedia  
(dalla prima cabina secondaria all'ultima cabina secondaria)

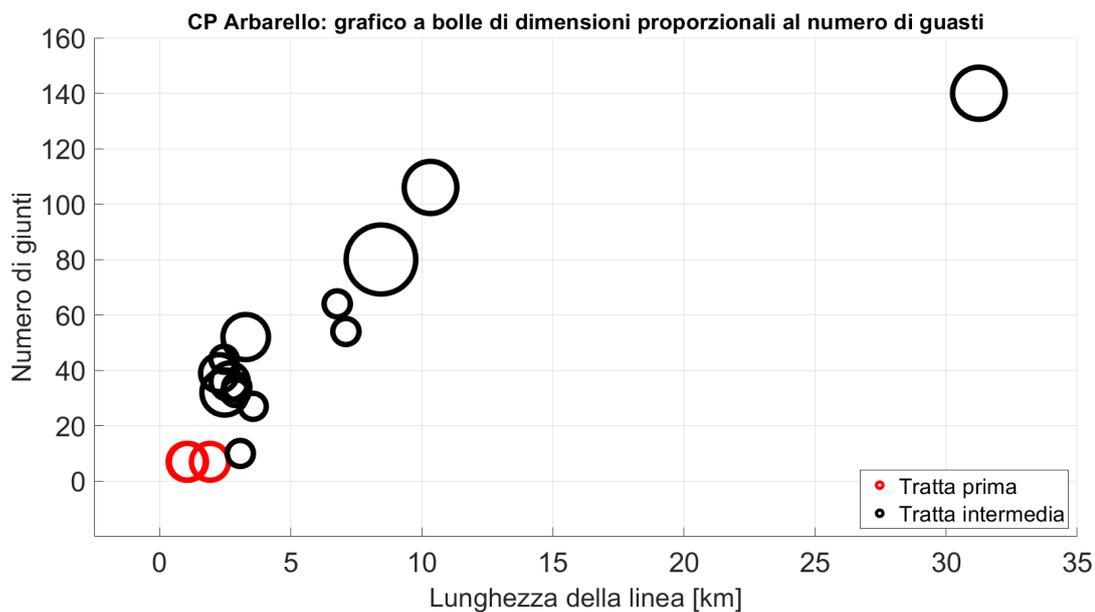


Figura 4.4: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Arbarello

### CP Arbarello

Come si può vedere in figura 4.4, è presente un'ampia gamma di lunghezze di linea, che si estende fino a circa 32 km. Il numero di giunti varia significativamente, raggiungendo le 140 unità. È presente un gruppo di linee con lunghezze più brevi (0-10 km) e un numero variabile di giunti (20-100), alcuni dei quali presentano un numero moderato di guasti. Una bolla grande è evidente a circa 31 km di lunghezza e 140 giunti, indicando un numero elevato di guasti per quella linea specifica.

Le bolle rosse sono concentrate in corrispondenza di lunghezze molto brevi e un basso numero di giunti, con relativamente pochi guasti.

La tendenza generale suggerisce che linee più lunghe e con un numero maggiore di giunti possano essere correlate a più guasti, ma non sempre si tratta di una relazione lineare.

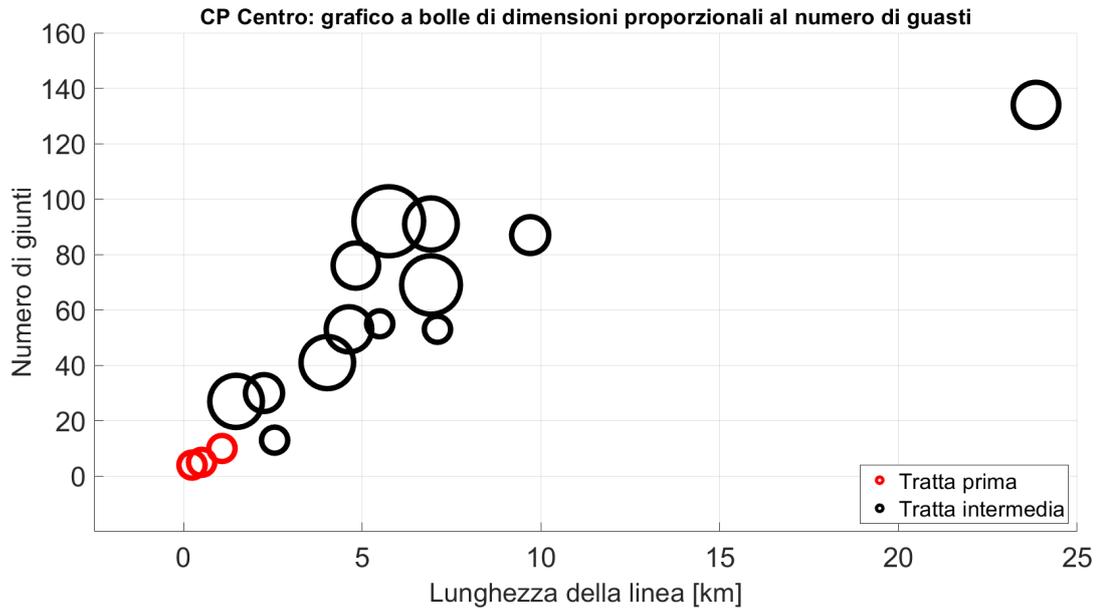


Figura 4.5: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Centro

### CP Centro

Analogamente ad Arbarello, in figura 4.5 si osserva un intervallo considerevole di lunghezze e di giunti. Una bolla tra le più grandi è presente a circa 24 km di lunghezza e 134 giunti, indicando un elevato numero di guasti. Diversi altri segmenti, in particolare tra 5 e 10 km di lunghezza e 60-100 giunti, mostrano anche dimensioni significative.

Le bolle rosse sono raggruppate in corrispondenza di brevi lunghezze e basso numero di giunti, indicando un esiguo numero di guasti.

La concentrazione di bolle di dimensioni moderate nell'intervallo 5-10 km suggerisce che anche lunghezze intermedie con un buon numero di giunti possono essere problematiche. Ciò potrebbe indicare l'invecchiamento della rete o specifici fattori di stress ambientale nell'area centrale.

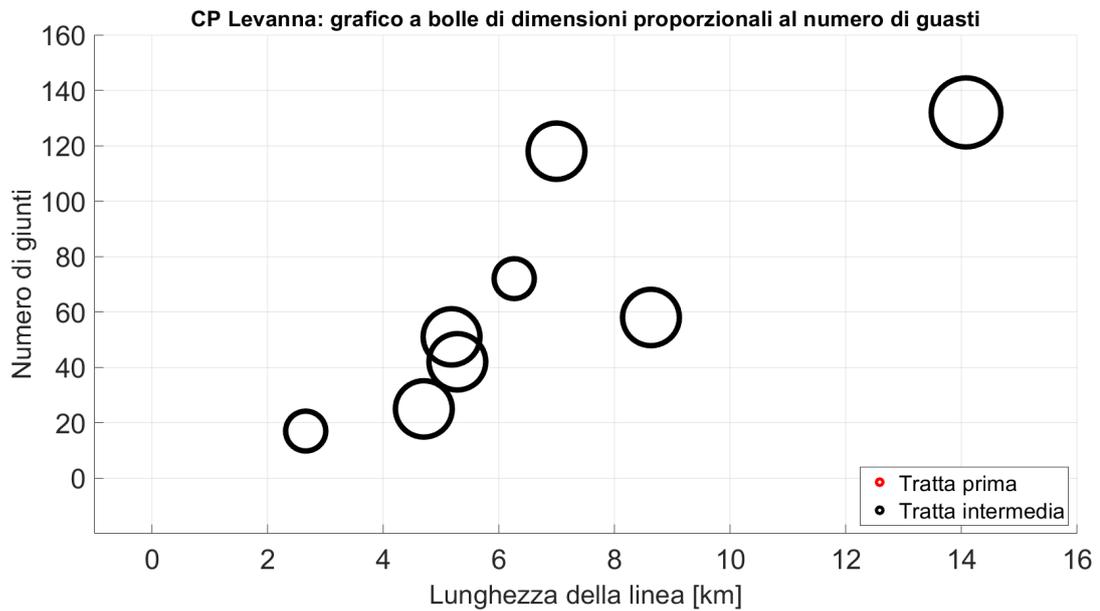


Figura 4.6: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Levanna

### CP Levanna

Questo grafico illustrato in figura 4.6 mostra meno dati rispetto ad Arbarello e Centro, con lunghezze delle linee generalmente inferiori.

La bolla più grande si trova a circa 14 km di lunghezza e 132 giunti, rappresentando il numero più elevato di guasti.

Altre bolle significative compaiono a circa 5 km di lunghezza e 40 giunti.

Non sono visibili bolle rosse su questo grafico.

Anche in aree con lunghezze di cavo generalmente inferiori, i segmenti critici con un elevato numero di giunti possono essere soggetti a un numero di guasti significativi.

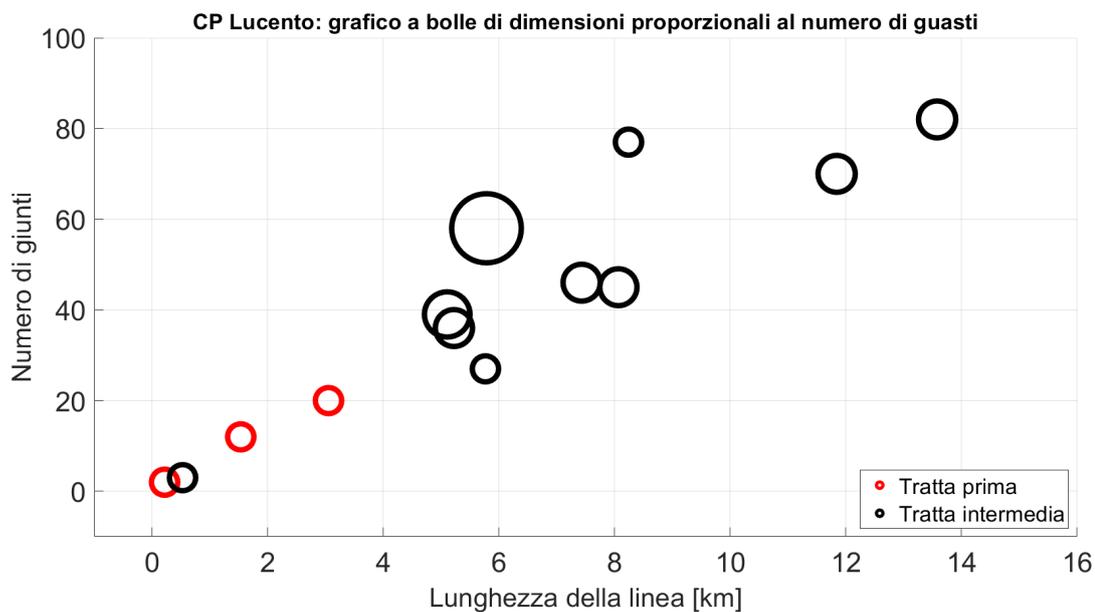


Figura 4.7: Bubbleplot relativo alla Cabina Primaria Lucento

### CP Lucento

In figura 4.7 l'intervallo dell'asse Y per il "Numero di giunti" è inferiore (fino a 100) rispetto ai grafici precedenti.

Le bolle rosse sono più evidenti e si estendono da 0 a 3 km di lunghezza, con un basso numero di giunti, mostrando generalmente pochi guasti.

Sono visibili diverse bolle nere con un elevato numero di guasti, in particolare intorno ai 6 km di lunghezza e 60 giunti, e anche a 8 km di lunghezza e 50 giunti. La presenza di sezioni di "Tratta prima" (rosse) più visibili con un basso numero di guasti conferma la loro relativa affidabilità, a dispetto dell'ipotesi iniziale.

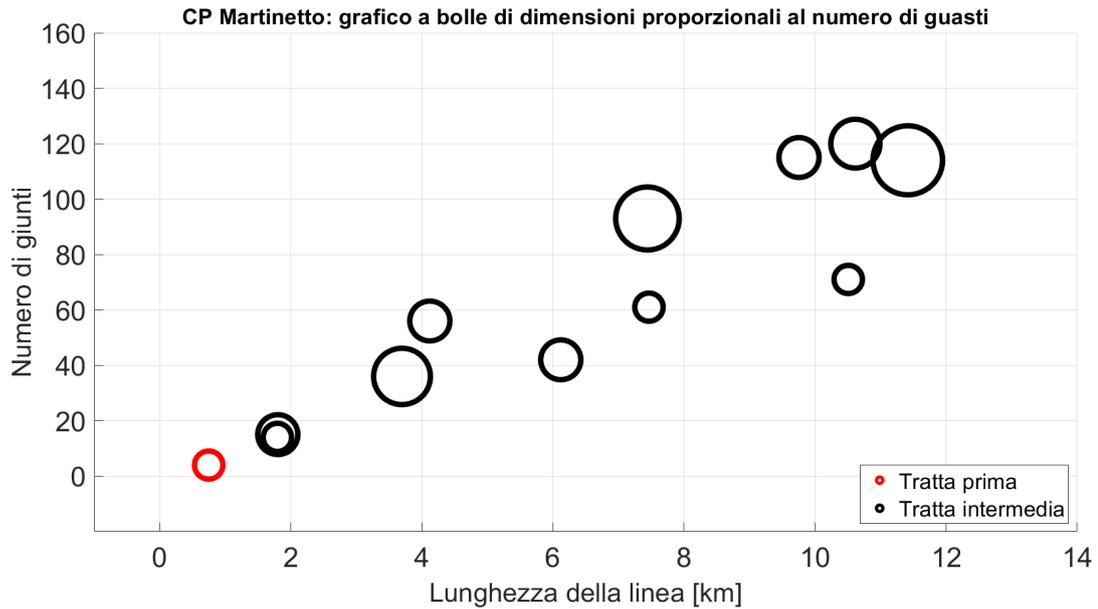


Figura 4.8: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Martinetto

### CP Martinetto

La bolla più grande in figura 4.8 è relativa alla linea lunga circa 11 km e con 114 giunti.

Una singola bolla rossa è presente a una lunghezza molto ridotta e con un basso numero di giunti, e indica pochi guasti. Il grafico mostra uno schema in cui i guasti sembrano caratterizzare i tratti intermedi più lunghi e con un numero relativamente elevato di giunti. Ciò rafforza l'idea che un numero crescente di giunti contribuisca in modo significativo all'incidenza dei guasti.

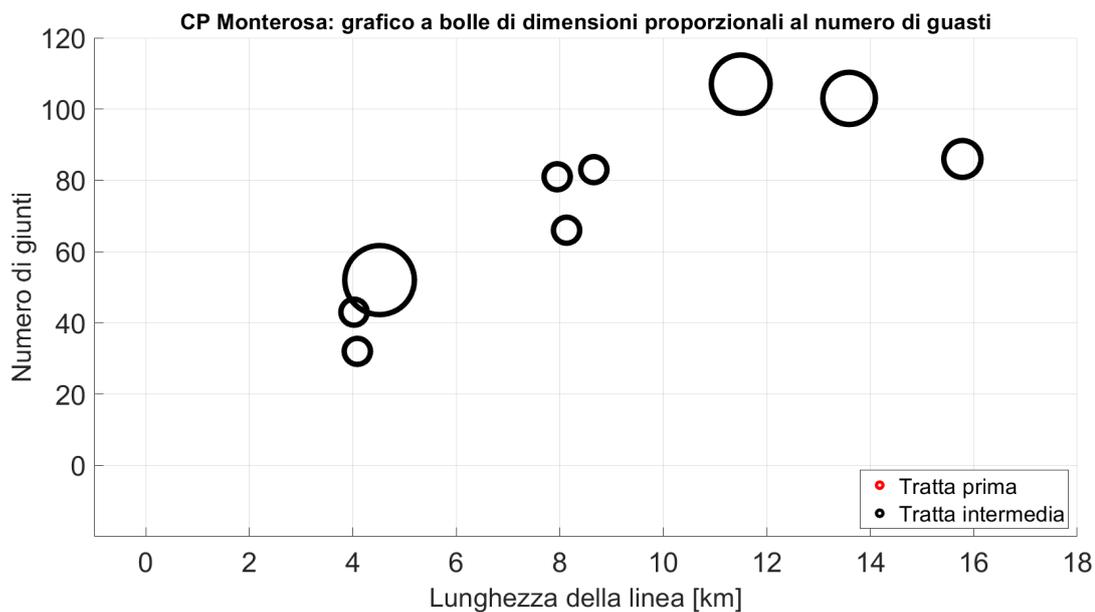


Figura 4.9: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Monterosa

### CP Monterosa

Come si può vedere in figura 4.9, le bolle più grandi si trovano a circa 12 km di lunghezza e circa 105 giunti. Un gruppo di bolle appare tra i 4 e i 5 km di lunghezza, con giunti variabili (30-60) e un numero di guasti moderato.

Il grafico evidenzia che tratti di guasto critici possono verificarsi anche in aree con un numero complessivo inferiore di segmenti di cavo.

I segmenti più lunghi con più giunti sembrano ancora una volta essere i più problematici.

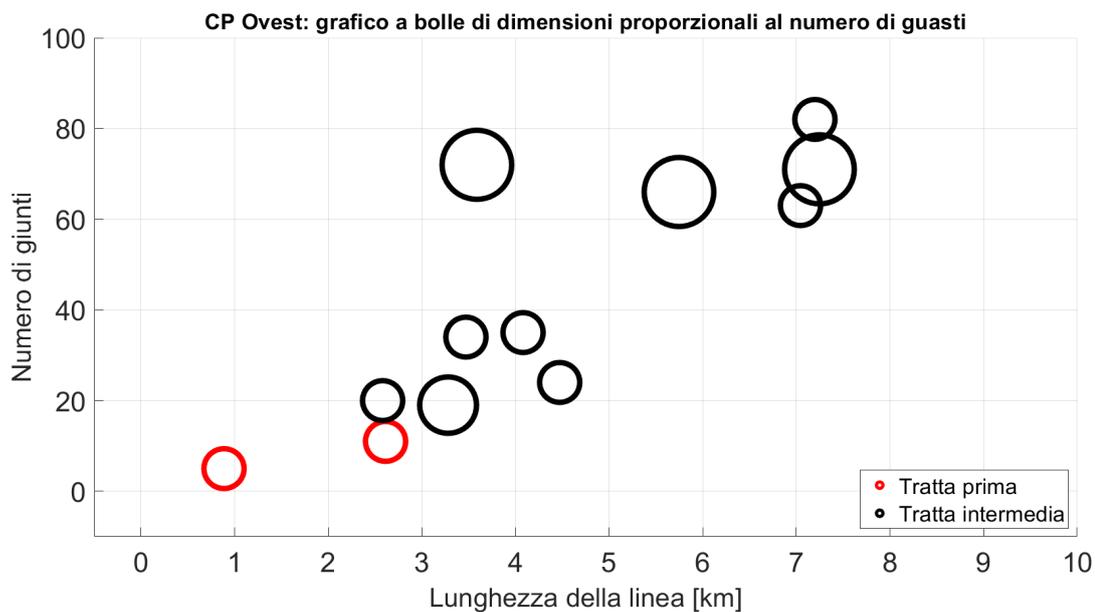


Figura 4.10: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Ovest

### CP Ovest

Come mostrato in figura 4.10, le lunghezze complessive delle linee sono ridotte, fino a circa 9 km. Le bolle più grandi sono concentrate tra i 6 e i 7,5 km di lunghezza, con un numero di giunti compreso tra 60 e 85.

Le bolle rosse sono presenti in corrispondenza di tratti brevi e con un basso numero di giunti bassi, indicando pochi guasti. Nonostante la minore lunghezza complessiva delle linee, il grafico presenta un numero significativo di guasti in specifici segmenti intermedi. Ciò suggerisce che anche all'interno di una rete più compatta, specifiche combinazioni di lunghezza e giunti possono portare a vulnerabilità.

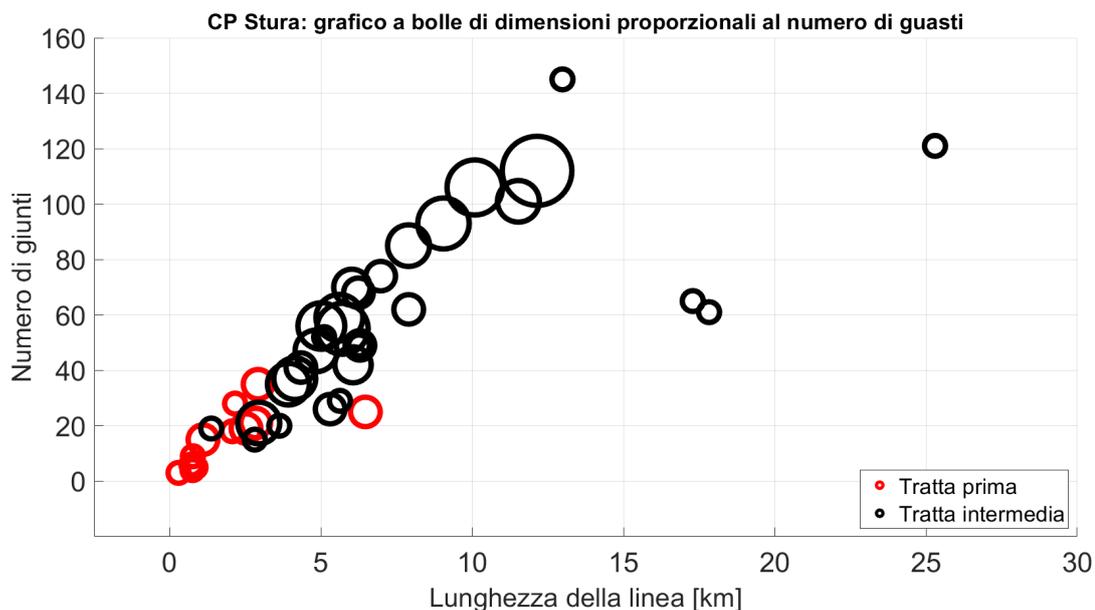


Figura 4.11: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Stura

### CP Stura

Questo grafico in figura 4.11 mostra una concentrazione molto densa di dati, in particolare a lunghezze medio-brevi (0-15 km).

L'intervallo di lunghezza delle linee è ampio, fino a circa 25 km, con un numero di giunti che raggiunge le 145 unità. C'è una chiara tendenza: all'aumentare della lunghezza e del numero di giunti, la dimensione delle bolle tende generalmente ad aumentare, indicando una correlazione positiva con il numero di guasti. Una bolla molto grande è presente a circa 13 km di lunghezza e circa 110 giunti.

Le bolle rosse sono numerose e per lo più raggruppate a lunghezze più brevi e con un numero inferiore di giunti, con piccole dimensioni.

Stura fornisce la prova visiva più chiara di una relazione diretta: linee più lunghe e con più giunti generalmente portano a più guasti. L'elevata densità e la tendenza costante rendono questo un valido esempio di come le scelte di progettazione della rete (ad esempio, il numero di giunti per km) possano influire sull'affidabilità.

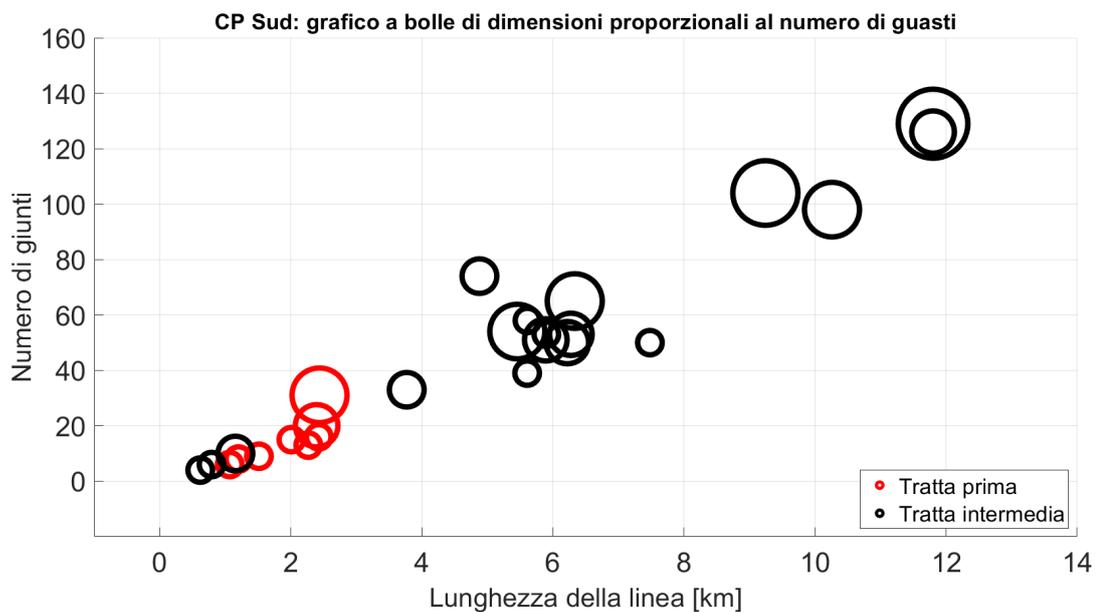


Figura 4.12: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Sud

### CP Sud

Come si vede in figura 4.12, le lunghezze delle linee sono per lo più fino a 12 km. Sono visibili bolle rosse tra 1 km e 2,4 km di lunghezza, con un numero variabile di giunti (da 6 a 31) e un numero generalmente basso di guasti. Inoltre, sono evidenti diverse grandi bolle nere, in particolare tra 5 km e 7 km di lunghezza e intorno a 9-12 km di lunghezza. Similmente alla CP Lucento, la CP Sud dimostra la relativa robustezza delle sezioni di prima tratta delle linee.

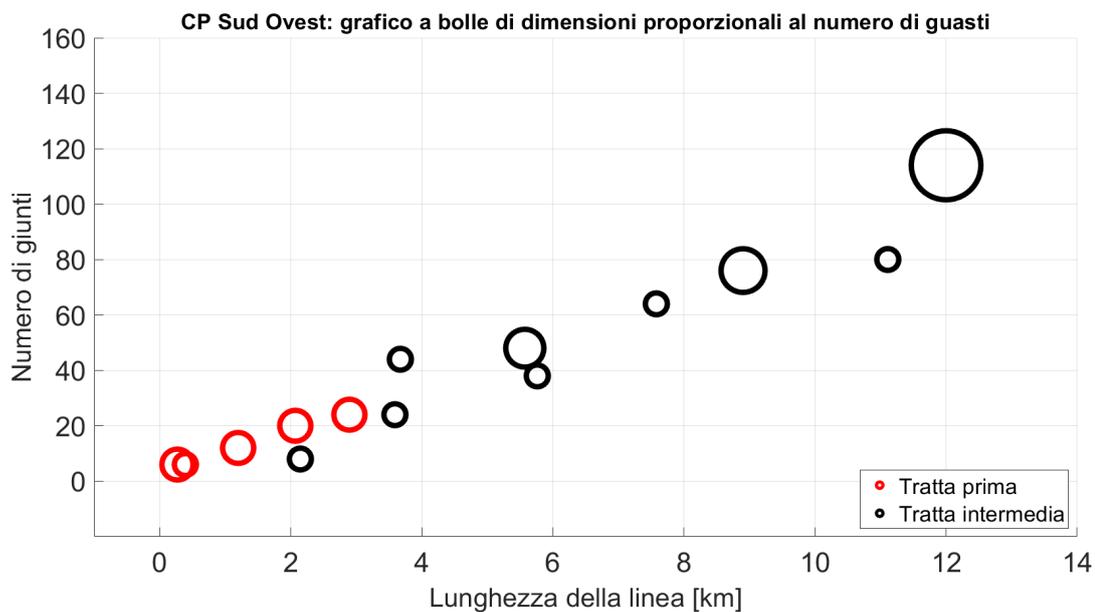
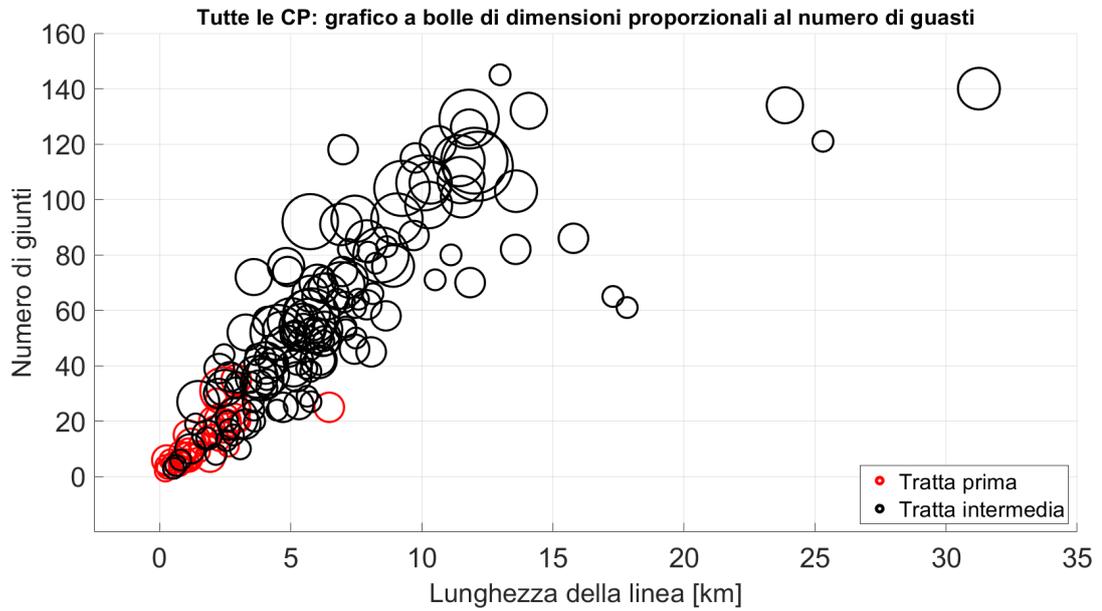


Figura 4.13: Bubble plot relativo alla Cabina Primaria Sud Ovest

### CP Sud Ovest

Come si vede in figura 4.13, le lunghezze della linea arrivano fino a circa 12 km. Le bolle rosse sono visibili tra 0,3 e 3 km di lunghezza, con sempre un basso numero di giunti e guasti. Il grafico mostra una progressione in cui, all'aumentare della lunghezza e dei giunti, il numero di guasti aumenta. La bolla più grande è infatti presente all'estremità dei dati.

Adesso invece in figura 4.14 si riporta la seconda variante di grafico bubble plot, ovvero quella complessiva di tutte le linee in partenza dalle varie cabine primarie.



**Figura 4.14:** Bubble plot complessivo di tutte le Cabine Primarie

Infine, ecco la terza e ultima variante di grafico bubble plot illustrata in figura 4.15, ovvero quella complessiva di tutte le linee in partenza dalle varie cabine primarie. Questa volta è presente anche il colore appartenente a ciascuna cabina primaria di appartenenza.

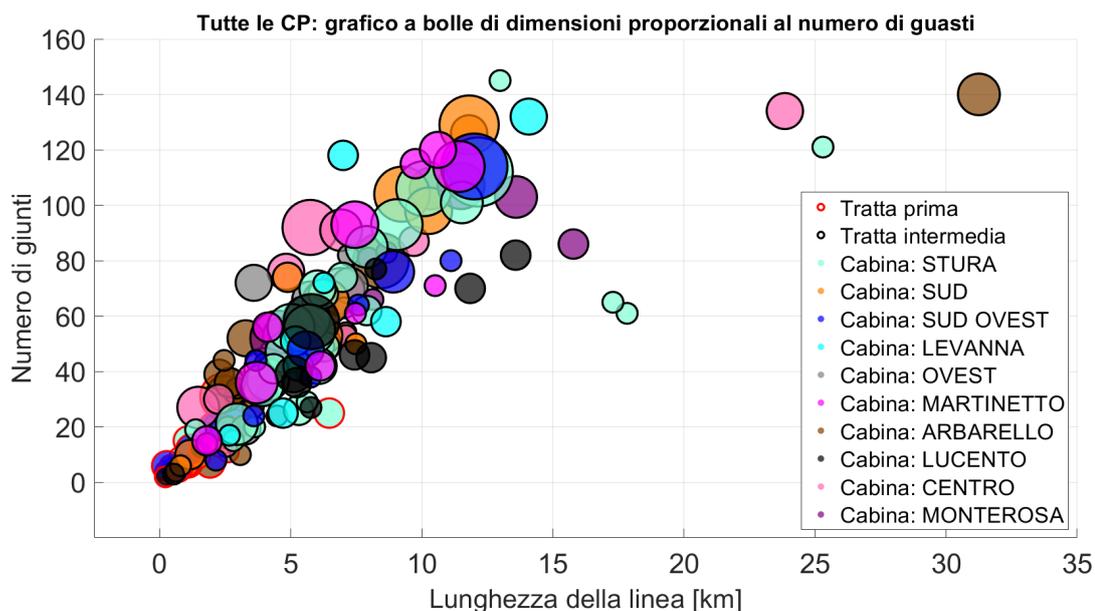


Figura 4.15: Bubble plot complessivo di tutte le Cabine Primarie

### Osservazioni generali

Correlazione tra lunghezza, giunti e guasti:

Una tendenza costante in quasi tutti i grafici delle cabine primarie è che i tratti di linea con lunghezza e un numero di giunti maggiore tendono a presentare un più alto numero di guasti (dimensioni maggiori delle bolle). Questo convalida l'intuitiva comprensione secondo cui una maggiore complessità (più giunti) ed esposizione (maggiore lunghezza), aumentano intrinsecamente la probabilità di guasto.

I grafici complessivi evidenziano in particolare questa correlazione positiva grazie alla loro più densa distribuzione dei dati.

Ruolo dei giunti come punti di guasto:

I dati suggeriscono fortemente che i giunti siano punti critici di vulnerabilità. Le linee con un numero elevato di giunti, anche di lunghezze moderate, mostrano spesso un numero significativo di guasti. Ciò potrebbe essere attribuito a: qualità dell'installazione, degrado dei materiali oppure il fatto di essere più sensibili ai fattori ambientali. Infatti, i giunti rappresentano discontinuità nel cavo che portano alla concentrazione di sollecitazioni sotto carichi meccanici o elettrici.

Distinzione tra "Tratta Prima" e "Tratta Intermedia":

Le "Tratta Prima" (bolle rosse) mostrano costantemente un basso numero di guasti e sono generalmente associate a lunghezze inferiori e a un minor numero di giunti. Ciò potrebbe indicare che queste tratte iniziali siano: installazioni più recenti, soggetti a controlli di qualità più rigorosi durante l'installazione e meno esposti a fattori di stress ambientale a causa della loro posizione. Le "Tratta Intermedia" (bolle nere), d'altra parte, sono spesso responsabili della maggior parte dei guasti. Ciò suggerisce che queste sezioni, forse più vecchie o gestite in modo meno rigoroso, contribuiscano in modo significativo all'inaffidabilità della rete.

Variabilità tra le aree operative:

Sebbene le tendenze generali rimangano stabili, si riscontrano differenze nella distribuzione e nell'intensità dei guasti.

Alcune aree (ad esempio: Arbarello, Centro, Stura) mostrano tratte con un numero di guasti elevato su lunghezze molto elevate e un elevato numero di giunti, mentre altre (ad esempio Ovest) mostrano guasti significativi anche su lunghezze complessive inferiori. Questa variabilità sottolinea l'importanza di analisi localizzate e strategie di intervento personalizzate.

Priorità degli interventi di ammodernamento della rete:

L'identificazione di "hotspot" in diverse aree fornisce una base chiara per stabilire le priorità degli interventi di manutenzione e sostituzione. Questi tratti rappresentano i punti di guasto più critici e dovrebbero essere affrontati per primi per massimizzare la qualità del servizio elettrico.

### 4.2.3 Heatmap

La heatmap, come illustrato in figura 4.16, offre una visualizzazione sintetica della relazione tra tre variabili chiave nella gestione delle reti in cavo: la lunghezza della linea, il numero di giunti e il numero medio di eventi (guasti).

Risulta essere così costruita:

Asse X: lunghezza della linea

Rappresenta la lunghezza dei tratti, discretizzata in bin.

Asse Y: numero di giunti

Indica il numero di giunti presenti nei tratti di linea, anche qui discretizzato in bin.

Colore delle celle: Il colore di ogni cella (bin) rappresenta il "numero di eventi medio", come indicato dalla colorbar sulla destra.

- blu scuro: corrisponde a un numero medio di eventi pari a 0.
- colori freddi: indicano un numero medio di eventi basso.
- colori caldi: indicano un numero medio di eventi più elevato, con il rosso che rappresenta il massimo (6 o più).

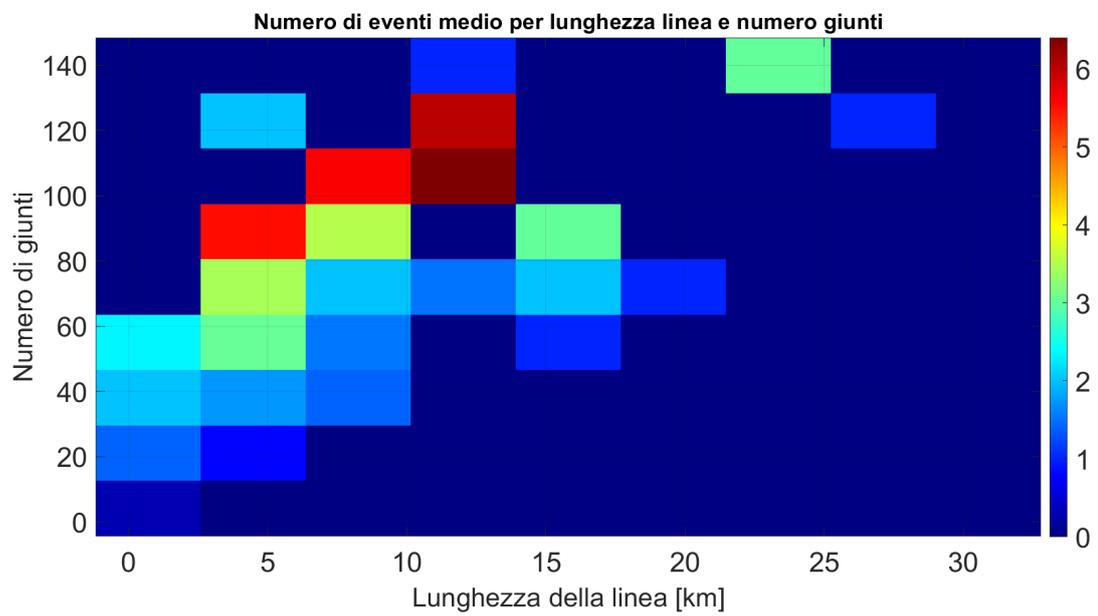


Figura 4.16: Heatmap complessiva di tutte le Cabine Primarie

## **Osservazioni generali**

Regioni a bassa criticità:

La maggior parte della heatmap è dominata dal colore blu chiaro, indicando che la maggior parte delle combinazioni "lunghezza linea - numero giunti" presenta un numero basso di eventi medi. Questo è un dato positivo che suggerisce una buona affidabilità generale della rete per la maggior parte delle configurazioni. Le regioni con una lunghezza di linea corta (es. 0-5 km) e un basso numero di giunti (es. 0-60 giunti) sono quasi universalmente di colore blu chiaro o ciano, confermando che i segmenti più corti e meno complessi siano meno problematici, come già suggerito dai grafici a bolle ("Tratta prima").

Identificazione degli "hotspot":

Le aree più critiche si concentrano in specifiche regioni di lunghezza compresa tra 5-15 km, e con un numero di giunti tra 90-140.

Un'area rosso intenso si trova tra circa 10-15 km di lunghezza e 110-130 giunti, indicando il massimo numero medio di eventi (6 o più).

Subito sotto, tra circa 5-15 km di lunghezza e 70-100 giunti, si trovano celle di colore giallo/verde chiaro, che indicano un numero elevato di eventi (3-5).

Tratti di lunghezza tra 22-25 km e con 130-150 giunti contengono una cella verde chiaro, indicando una criticità intermedia in questa regione, suggerendo che anche a lunghezze maggiori e con un numero di giunti elevato, seppur con minore frequenza, possano verificarsi problemi.

Correlazione Lunghezza-Giunti-Eventi:

La heatmap rafforza l'evidenza che non è solo la lunghezza o il numero di giunti singolarmente a determinare la criticità, ma la loro combinazione. Le aree con alte densità di eventi sono quelle in cui entrambi i parametri assumono valori elevati. Si nota una tendenza diagonale ascendente per le zone più problematiche (dal verde al rosso), suggerendo che all'aumentare di entrambi i fattori, aumenta anche il rischio di guasti.

Tuttavia, non tutte le combinazioni di "lunghezza elevata" e "giunti elevati" sono ugualmente problematiche. Ad esempio, ci sono zone blu a lunghezze maggiori (es. oltre 15 km) con giunti in media quantità, il che potrebbe indicare che tali

configurazioni risultino rare o, se presenti, siano state implementate in modo più robusto.

Discretizzazione e media:

È fondamentale ricordare che questa heatmap mostra il numero medio di eventi per bin. Questo significa che anche un bin con un valore medio moderato (es. verde chiaro) potrebbe contenere alcuni segmenti con un numero molto elevato di eventi, bilanciati da altri con pochi. La scelta del binning (in questo caso 10 sia per la lunghezza che per i giunti) influenza la granularità della visualizzazione. In ogni caso, più prove di discretizzazione sono state effettuate, ma questa risulta essere quella più rappresentativa.

In sintesi, la heatmap è uno strumento diagnostico potente che consente di individuare rapidamente i tratti di rete più vulnerabili, guidando gli ingegneri verso interventi mirati e miglioramenti strategici per l'affidabilità del sistema.

## Capitolo 5

# Conclusioni

Questa tesi ha valutato i principali vantaggi e criticità che si possono riscontrare collegando gli schermi metallici dei cavi di media tensione tra la sottostazione AT/MT e la prima cabina di trasformazione MT/BT. Tra le considerazioni che si possono trovare in letteratura, è emerso che in condizioni di esercizio critiche, quali guasti a terra o sovratensioni dovute a fulminazioni sul lato alta tensione (AT), il collegamento degli schermi all'impianto di terra della sottostazione può comportare il trasferimento di tensioni elevate e correnti impulsive verso le cabine secondarie, incrementando il rischio di sollecitazioni pericolose per le apparecchiature e la sicurezza del personale operativo. L'entità delle correnti e dei potenziali trasferiti dipende da numerosi fattori quale ad esempio la resistività del terreno.

Si è quindi deciso di effettuare una campagna di misure presso la sottostazione Arbarello per misurare, tra le altre cose, la corrente negli schermi in condizioni di normale funzionamento. L'obiettivo era caratterizzare la tipologia di corrente che attraversa gli schermi, e capire l'entità e la natura delle sollecitazioni in un contesto reale. I valori efficaci delle correnti sono risultati inferiori a 5 A. Le analisi termiche trovate in letteratura e le prove sperimentali condotte non hanno evidenziato criticità di natura termica nei cavi dotati di schermatura, in quanto la circolazione di corrente nella guaina metallica genera effetti termici trascurabili. Anche nei casi limite documentati in letteratura, l'incremento della temperatura dell'isolamento risulta contenuto, con variazioni inferiori ai 10 °C.

Si è infine effettuata un'analisi dei guasti avvenuti sulla rete di distribuzione MT della città di Torino, al fine di valutare l'impatto della lunghezza della linea, del numero di giunti e della posizione della tratta affetta da guasto nella dorsale sulla probabilità che si manifesti un guasto. I risultati dell'analisi hanno evidenziato che i giunti dei cavi MT costituiscono il principale elemento di vulnerabilità della rete. Al crescere del numero di giunti per tratta, aumenta la probabilità di avere un guasto a terra. L'analisi ha anche appurato che i guasti in prima tratta, quella cioè che dalla sottostazione AT/MT va alla prima cabina MT/BT della dorsale, sono

inferiori alla media dei guasti delle tratte intermedie. Siccome scollegare gli schermi dei cavi MT dall'impianto di terra della sottostazione ha un impatto significativo solo sulle correnti che circolano sugli schermi della prima tratta a causa della natura fortemente magliata della rete di terra, non sembra essere particolarmente efficace scollegare gli schermi.

# Bibliografia

- [1] G. Chicco. Slide delle lezioni del corso "Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica", a.a. 2023–2024 (cit. alle pp. 1, 2).
- [2] F. Stevanato e Bussetto D. *La tecnologia degli impianti in alta tensione*. IML, 2016 (cit. alle pp. 3, 5, 13).
- [3] A. Russo e P. Colella. Slide delle lezioni del corso "Fondamenti di Impianti Elettrici", a.a. 2021–2022 (cit. alle pp. 5–7, 13–15).
- [4] Com Cavi S.p.A. *Cavi elettrici di media tensione*. Accessed: 4 March 2025. 2025. URL: <https://www.comcavi.it/cavi/cavi-elettrici-media-tensione/re4h1r/> (cit. a p. 5).
- [5] M.Stecca. «Analisi delle soluzioni tecniche per la ricerca dei guasti nei cavi di MT». Tesi di laurea mag. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova, 2021 (cit. alle pp. 6, 7).
- [6] Virginia Negri, Alessandro Mingotti, Roberto Tinarelli e Lorenzo Peretto. «Comparison of Algorithms for the AI-Based Fault Diagnostic of Cable Joints in MV Networks». In: *Energies* 16.1 (2023), p. 470. DOI: 10.3390/en16010470. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/470> (cit. alle pp. 7, 8, 13).
- [7] Raytech S.r.l. *Giunti termorestringenti unipolari*. Accessed: 10 April 2025. 2025. URL: <https://www.raytech.it/categoria-prodotto/media-tensione> (cit. alle pp. 8, 9).
- [8] REPL Italia S.r.l. *Relazione finale del progetto MAN-PREV: Accessori intelligenti per cavi MT per il monitoraggio della rete elettrica*. Relazione tecnica CCSEB00106. Progetto finanziato ai sensi del Decreto Direttoriale 30 giugno 2014, art. 10, comma 2, lettera b. Ministero dello Sviluppo Economico, mag. 2020 (cit. alle pp. 9–11).
- [9] Luigi Calcara, Luigi D’Orazio, Maurizio Della Corte, Guglielmo Di Filippo, Alessio Pastore, Davide Ricci e Massimo Pompili. «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints». In: *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2019.8893351 (cit. alle pp. 10, 11, 19).

- [10] «Analysis of Joint & Termination Failures on Extruded Dielectric Cables». In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-103.12 (dic. 1984), pp. 3581–3590 (cit. a p. 13).
- [11] X. Dong, Y. Yuan, Z. Gao, C. Zhou, P. Wallace, B. Alkali, B. Sheng e H. Zhou. «Analysis of Cable Failure Modes and Cable Joint Failure Detection via Sheath Circulating Current». In: *Electrical Insulation Conference (EIC)*. Philadelphia, PA, USA, giu. 2014 (cit. a p. 13).
- [12] Alfonso Sturchio, Gianluigi Fioriti, Vincenzo Salusest, Luigi Calcara e Massimo Pompili. «Thermal behavior of distribution MV underground cables». In: *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/AEIT.2015.7415247 (cit. alle pp. 17, 18).
- [13] A.Niero. «Confronto tra approccio analitico e simulazioni FEM per il dimensionamento delle reti di terra per sottostazioni». Tesi di laurea mag. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova, 2021 (cit. a p. 19).
- [14] G.Ala, S.Favuzza, E.Francomano, G.Giglia e G.Zizzo. «On the distribution of lightning current among interconnected grounding systems in medium voltage grids». In: *Energies* 11.4 (2018), pp. 1–16 (cit. alle pp. 20, 23–25).
- [15] Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, José David Esparza e Iván David Serna Suárez. «Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures». In: *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*. Vol. 11. 2024 (cit. alle pp. 25, 26, 34, 35, 37).
- [16] «IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV». In: *IEEE Std 575-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)* (2014), pp. 1–83 (cit. a p. 26).
- [17] M. N. Abed, O. A. Suhry e M. A. Ibrahim. «Simulation of sheath voltage, losses and loss factor of high voltage underground cable using MATLAB/Simulink». In: *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 13.1 (mar. 2022), pp. 220–215 (cit. alle pp. 26, 29–32).
- [18] H.C. Doepken, R. Schoolcraft e O. Willis. «Medium voltage cable shielding and grounding». In: *Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 1989, pp. 43–46 (cit. a p. 27).
- [19] M. Rasoulpoor, M. Mirzaie e S. M. Mirimani. «Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method». In: *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 12.1 (mar. 2016), pp. 73–81 (cit. alle pp. 38–42, 44, 46, 47).